FLUENT 教程

赵玉新

I、目录

第一章、开始
第二章、操作界面
第三章、文件的读写
第四章、单位系统
第五章、读入和操作网格
第六章、边界条件
第七章、物理特性
第八章、基本物理模型
第九章、湍流模型
第十章、辐射模型
第十一章、化学输运与反应流
第十二章、污染形成模型
第十三章、相变模拟
第十四章、多相流模型
第十五章、动坐标系下的流动
第十六章、解算器的使用
第十七章、网格适应
第十八章、数据显示与报告界面的产生
第十九章、图形与可视化
第二十章、Alphanumeric Reporting
第二十一章、流场函数定义
第二十二章、并行处理
第二十三章、自定义函数
第二十四章、参考向导
第二十五章、索引（Bibliography）
第二十六章、命令索引

II、如何使用该教程

概述

本教程主要介绍了 FLUENT 的使用，其中附带了相关的算例，从而能够使每一位使用者在学习的同时积累相关的经验。本教程大致分以下四个部分：第一部分包括介绍信息、用户界面信息、文件输入输出、单位系统、网格、边界条件以及物理特性。第二和第三部分包含物理模型，解以及网格适应的信息。第四部分包括界面的生成、后处理、图形报告、并行处理、自定义函数以及 FLUENT 所使用的流场函数与变量的定义。

下面是各章的简略概括

第一部分：

- 开始使用：本章描述了 FLUENT 的计算能力以及它与其它程序的接口。介绍了如何对具体的应用选择适当的解形式，并且概述了问题解决的大致步骤。在本章中，我们给出

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

了一个可以在你自己计算机上运行的简单的算例。

- 使用界面：本章描述了用户界面、文本界面以及在线帮助的使用方法。同时也提供了远程处理与批处理的一些方法。（请参考关于特定的文本界面命令的在线帮助）
- 读写文件：本章描述了 FLUENT 可以读写的文件以及硬拷贝文件。
- 单位系统：本章描述了如何使用 FLUENT 所提供的标准与自定义单位系统。
- 读和操纵网格：本章描述了各种各样的计算网格来源，并解释了如何获取关于网格的诊断信息，以及通过尺度化（scale）、分区（partition）等方法对网格的修改。本章还描述了非一致（nonconformal）网格的使用.
- 边界条件：本章描述了 FLUENT 所提供的各种类型边界条件，如何使用它们，如何定义它们 and how to define boundary profiles and volumetric sources.
- 物理特性：本章描述了如何定义流体的物理特性与方程。FLUENT 采用这些信息来处理你的输入信息。

第二部分：

- 基本物理模型：本章描述了 FLUENT 计算流体流动和热传导所使用的物理模型（包括自然对流、周期流、热传导、swirling、旋转流、可压流、无粘流以及时间相关流）。以及在使用这些模型时你需要输入的数据，本章也包含了自定义标量的信息。
- 湍流模型：本章描述了 FLUENT 的湍流模型以及使用条件。
- 辐射模型：本章描述了 FLUENT 的热辐射模型以及使用条件。
- 化学组分输运和反应流：本章描述了化学组分输运和反应流的模型及其使用方法。本章详细的叙述了 prePDF 的使用方法。
- 污染形成模型：本章描述了 NOx 和烟尘的形成的模型，以及这些模型的使用方法。

第三部分：

- 相变模拟：本章描述了 FLUENT 的相变模型及其使用方法。
- 离散相变模型：本章描述了 FLUENT 的离散相变模型及其使用方法。
- 多相流模型：本章描述了 FLUENT 的多相流模型及其使用方法。
- Flows in Moving Zones（移动坐标系下的流动）：本章描述了 FLUENT 中单一旋转坐标系，多重移动坐标系，以及滑动网格的使用方法。
- Solver 的使用：本章描述了如何使用 FLUENT 的解法器（solver）。
- 网格适应：本章描述了 explains the solution-adaptive mesh refinement feature in FLUENT and how to use it

第四部分：

- 显示和报告数据界面的创建：本章描述了 explains how to create surfaces in the domain on which you can examine FLUENT solution data
- 图形和可视化：本章描述了检验 FLUENT 解的图形工具
- Alphanumeric Reporting：本章描述了如何获取流动、力、表面积分以及其它解的数据。
- 流场函数的定义：本章描述了如何定义 FLUENT 面板内出现的变量选择下拉菜单中的流动变量，并且告诉我们如何创建自己的自定义流场函数。
- 并行处理：本章描述了 FLUENT 的并行处理特点以及使用方法
- 自定义函数：本章描述了如何通过用户定义边界条件，物理性质函数来形成自己的 FLUENT 软件。

如何使用该手册

- 根据你对 CFD 以及 FLUENT 公司的熟悉，你可以通过各种途径使用该手册

对于初学者，建议如下：

- 为了对 FLUENT 的计算能力以及启动方式有所了解，最好是阅读“开始”这一章。本章为你提供了选择解形式的建议，同时为你提供了一个简单的自学教程，在该教程中我们使用 FLUENT 解决了一个简单的问题。
- 要想知道如何使用界面与远程控制，请参阅“使用界面”一章
- 读写文件的方法在“读写文件”一章
- 在开始解决问题之前我们需要输入网格，要想知道如何输入及检查网格请参阅“读与操纵网格”一章。要想知道解适应过程，请参阅“网格适应”一章
- 选择物理模型请参阅“基本物理模型—动坐标系下的流动”
- 对于边界条件的信息请参阅“边界条件”一章。对于流体性质请参阅“物理特性”一章
- 设定解的参数请参阅“Using the Solver”一章
- 显示和分析结果请参阅“数据显示和数据报告界面的创建—-Alphanumeric Reporting”一章
- 检查 FLUENT 中流动变量的定义请参阅“流场函数定义”一章
- 关于 FLUENT 并行计算解请参阅“并行处理”一章
- 关于如何使用 FLUENT 的在线帮助请参阅“用户界面”一章
- 对于特定的问题和你所要使用的工具，请查阅相关内容的列表以及索引

对于有经验的使用者，建议如下：

如果你是一个有经验的使用者，只需要查找一些特定的信息，那么有三种不同的方法供你使用该手册。目录列表和主题列表是按程序顺序排列的，从而使你能够按照特定程序的步骤查找相关资料。本手册为你提供了两个不同的索引：一、命令索引，该索引为你提供特定了面板和文本命令的使用方法。二、分类索引，该索引为你提供了特定类别的信息（在线帮助中没有此类索引，只能在印刷手册中找到它）。

本手册的排版协定

为了方便用户的学习，本教程有几个约定成俗的排版协定。

- 在下拉菜单中进入控制面板的过程我们采用 "/"。例如，Define/Materials..告诉我们在 Define 下拉菜单中选择 Materials...。
- 因尚未翻译完全，其它排版情况待定。

什么时候使用 Support Engineer

Support Engineer 能够帮助你计划你的 CFD 模型工程并为你解决在使用 FLUENT 中所遇到的困难。在遇到困难时我们建议你使用 Support Engineer。但是在使用之前有以下几个注意事项：

- 仔细阅读手册中关于你使用并产生问题的命令的信息
- 回忆导致你产生问题的每一步
- 如果可能的话，请记下所出现的错误信息
- 对于特别困难的问题，保存 FLUENT 出现问题时的日志以及手稿。在解决问题时，它是最好的资源。

第一章　开始

赵玉新（国防科技大学航天学院）

注意：此文只用于流体力学的教学和科学研究，如若涉及到版权问题请于本人联系。

本章对 FLUENT 做了大致的介绍，其中包括：FLUENT 的计算能力，解决问题时的指导，选择解的形式。为了便于理解，我们在本章演示了一个简单的例子，该例子的网格文件在安装光盘中已准备好。

引言

FLUENT 是用于模拟具有复杂外形的流体流动以及热传导的计算机程序。它提供了完全的网格灵活性，你可以使用非结构网格，例如二维三角形或四边形网格、三维四面体/六面体/金字塔形网格来解决具有复杂外形的流动。甚至可以用混合型非结构网格。它允许你根据解的具体情况对网格进行修改（细化/粗化）。

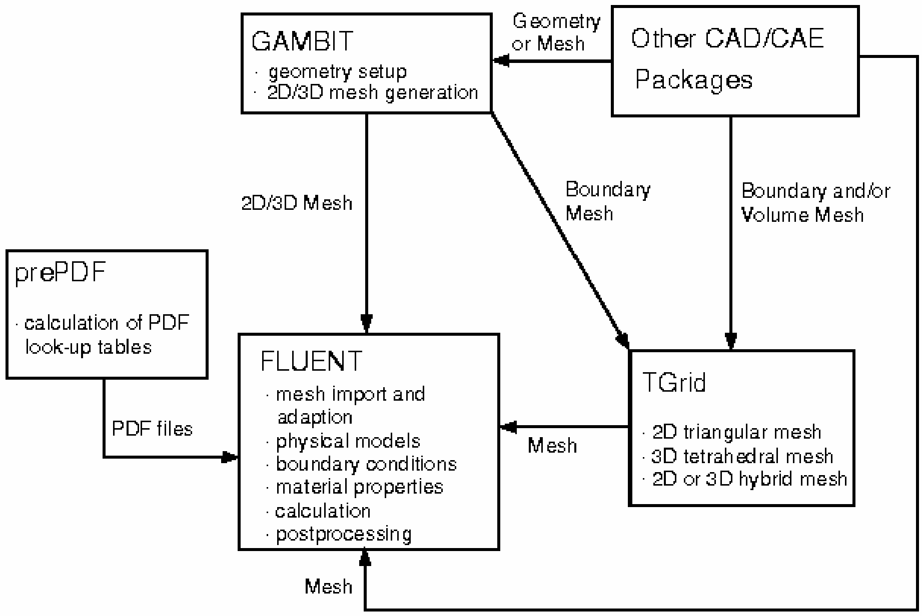
对于大梯度区域，如自由剪切层和边界层，为了非常准确的预测流动，自适应网格是非常有用的。与结构网格和块结构网格相比，这一特点很明显地减少了产生“好”网格所需要的时间。对于给定精度，解适应细化方法使网格细化方法变得很简单，并且减少了计算量。其原因在于：网格细化仅限于那些需要更多网格的解域。

FLUENT 是用 C 语言写的，因此具有很大的灵活性与能力。因此，动态内存分配，高效数据结构，灵活的解控制都是可能的。除此之外，为了高效的执行，交互的控制，以及灵活的适应各种机器与操作系统，FLUENT 使用 client/server 结构，因此它允许同时在用户桌面工作站和强有力的服务器上分离地运行程序。

在 FLUENT 中，解的计算与显示可以通过交互界面，菜单界面来完成。用户界面是通过 Scheme 语言及 LISP dialect 写就的。高级用户可以通过写菜单宏及菜单函数自定义及优化界面。

程序结构

该 FLUENT 光盘包括：FLUENT 解算器；prePDF,模拟 PDF 燃烧的程序；GAMBIT, 几何图形模拟以及网格生成的预处理程序；TGrid, 可以从已有边界网格中生成体网格的附加前处理程序；filters (translators)从 CAD/CAE 软件如：ANSYS，I－DEAS，NASTRAN，PATRAN 等的文件中输入面网格或者体网格。图一所示为以上各部分的组织结构。注意：在 Fluent 使用手册中 "grid" 和 "mesh"是具有相同所指的两个单词



图一：基本程序结构

我们可以用 GAMBIT 产生所需的几何结构以及网格（如想了解得更多可以参考 GAMBIT 的帮助文件，具体的帮助文件在本光盘中有，也可以在互联网上找到），也可以在已知边界网格（由 GAMBIT 或者第三方 CAD/CAE 软件产生的）中用 Tgrid 产生三角网格，四面体网格或者混合网格，详情请见 Tgrid 用户手册。也可能用其他软件产生 FLUENT 所需要的网格，比如 ANSYS(Swanson Analysis Systems, Inc.)、I-DEAS (SDRC)；或者 MSC/ARIES,MSC/PATRAN 以及 MSC/NASTRAN (都是 MacNeal-Schwendler 公司的软件)。与其他 CAD/CAE 软件的界面可能根据用户的需要酌情发展,但是大多数 CAD/CAE 软件都可以产生上述格式的网格。

一旦网格被读入 FLUENT，剩下的任务就是使用解算器进行计算了。其中包括，边界条件的设定，流体物性的设定，解的执行，网格的优化，结果的查看与后处理。

PreBFC 和 GeoMesh 是 FLUENT 前处理器的名字,在使用 GAMBIT 之前将会用到它们。对于那些还在使用这两个软件的人来说，在本手册中，你可以参考 preBFC 和 GeoMesh 的详细介绍。

本程序的能力

FLUENT 解算器有如下模拟能力：

- 用非结构自适应网格模拟 2D 或者 3D 流场，它所使用的非结构网格主要有三角形/五边形、四边形/五边形，或者混合网格，其中混合网格有棱柱形和金字塔形。（一致网格和悬挂节点网格都可以）
- 不可压或可压流动
- 定常状态或者过渡分析
- 无粘，层流和湍流
- 牛顿流或者非牛顿流
- 对流热传导，包括自然对流和强迫对流
- 耦合热传导和对流
- 辐射热传导模型
- 惯性（静止）坐标系非惯性（旋转）坐标系模型
- 多重运动参考框架，包括滑动网格界面和 rotor/stator interaction modeling 的混合界面
- 化学组分混合和反应，包括燃烧子模型和表面沉积反应模型
- 热，质量，动量，湍流和化学组分的控制体源
- 粒子，液滴和气泡的离散相的拉格朗日轨迹的计算，包括了和连续相的耦合
- 多孔流动
- 一维风扇/热交换模型
- 两相流，包括气穴现象
- 复杂外形的自由表面流动

上述各功能使得 FLUENT 具有广泛的应用，主要有以下几个方面

- Process and process equipment applications
- 油/气能量的产生和环境应用
- 航天和涡轮机械的应用
- 汽车工业的应用
- 热交换应用
- 电子/HVAC/应用
- 材料处理应用
- 建筑设计和火灾研究

总而言之，对于模拟复杂流场结构的不可压缩/可压缩流动来说，FLUENT 是很理想的软件。对于不同的流动领域和模型，FLUENT 公司还提供了其它几种解算器，其中包括 NEKTON,FIDAP、POLYFLOW、IcePak 以及 MixSim。

FLUENT 使用概述

FLUENT 采用非结构网格以缩短产生网格所需要的时间，简化了几何外形的模拟以及网格产生过程。和传统的多块结构网格相比，它可以模拟具有更为复杂几何结构的流场，并且具有使网格适应流场的特点。FLUENT 也能够使用适体网格，块结构网格(比如：FLUENT 4 和许多其它的 CFD 结算器的网格)。FLUENT 可以在 2D 流动中处理三角形网格和四边形网格，在 3D 流动中可以处理四面体网格，六边形网格，金字塔网格以及楔形网格（或者上述网格的混合）。这种灵活处理网格的特点使我们在选择网格类型时，可以确定最适合特定应用的网格拓扑结构。

在流场的大梯度区域，我们可以适应各种类型的网格。但是你必须在解算器之外首先产生初始网格，初始网格可以使用 GAMBIT、 Tgrid 或者某一具有网格读入转换器的 CAD 系统。

计划你的 CFD 分析

当你决定使 FLUENT 解决某一问题时，首先要考虑如下几点问题： 定义模型目标：从 CFD 模型中需要得到什么样的结果？从模型中需要得到什么样的精度；选择计算模型：你将如何隔绝所需要模拟的物理系统，计算区域的起点和终点是什么？在模型的边界处使用什么样的边界条件？二维问题还是三维问题？什么样的网格拓扑结构适合解决问题？物理模型的选取：无粘，层流还湍流？定常还是非定常？可压流还是不可压流？是否需要应用其它的物理模型？确定解的程序：问题可否简化？是否使用缺省的解的格式与参数值？采用哪种解格式可以加速收敛？使用多重网格计算机的内存是否够用？得到收敛解需要多久的时间？在使用 CFD 分析之前详细考虑这些问题，对你的模拟来说是很有意义的。当你计划一个 CFD 工程时，请利用提供给 FLUENT 使用者的技术支持。.

解决问题的步骤

确定所解决问题的特征之后，你需要以下几个基本的步骤来解决问题：

1．创建网格.

2．运行合适的解算器：2D、3D、2DDP、3DDP。

3．输入网格

4．检查网格

5．选择解的格式

6．选择需要解的基本方程：层流还是湍流（无粘）、化学组分还是化学反应、热传导模型等

7．确定所需要的附加模型：风扇，热交换，多孔介质等。

8．.指定材料物理性质

8．指定边界条件

9．调节解的控制参数

10．初始化流场

11．计算解

12．检查结果

13．保存结果

14．必要的话，细化网格，改变数值和物理模型。

第一步需要几何结构的模型以及网格生成。你可以使用 GAMBIT 或者一个分离的 CAD 系统产生几何结构模型及网格。也可以用 Tgrid 从已有的面网格中产生体网格。你也可以从相关的 CAD 软件包生成体网格，然后读入到 Tgrid 或者 FLUENT (详情参阅网格输入一章)。

至于创建几何图形生成网格的详细信息清查月相关软件使用手册

第二步，启动 FLUENT 解算器

后面将会介绍第三到十四步详细操作，下面的表告诉了我们哪一步需要什么软件

表一： FLUENT 菜单概述

解的步骤	菜单
读入网格	文件菜单
检查网格	网格菜单
选择解算器格式	定义菜单（Define Menu ）
选择基本方程	定义菜单
材料属性	定义菜单
边界条件	定义菜单
调整解的控制	解菜单（Solve Menu ）
初始化流场	解菜单
计算解	解菜单
结果的检查	显示菜单（Display Menu）&绘图菜单（Plot Menu）报告菜单（Report Menu ）
保存结果	文件菜单
网格适应	适应菜单

启动 FLUENT

UNIX 和 Windows NT 启动 FLUENT 的方式是不同的，详细参阅相关介绍。不同的安装过程也是为了使 FLUENT 能够正确启动而设定的。

单精度和双精度解算器

在所有计算机操作系统上 FLUENT 都包含这两个解算器。大多数情况下，单精度解算器高效准确，但是对于某些问题使用双精度解算器更合适。下面举几个例子：

如果几何图形长度尺度相差太多（比如细长管道），描述节点坐标时单精度网格计算就不合适了；如果几何图形是由很多层小直径管道包围而成（比如：汽车的集管）平均压力不大，但是局部区域压力却可能相当大（因为你只能设定一个全局参考压力位置），此时采用双精度解算器来计算压差就很有必要了。

对于包括很大热传导比率和（或）高比率网格的成对问题，如果使用单精度解算器便无法有效实现边界信息的传递，从而导致收敛性和（或）精度下降

在 UNIX 系统启动 FLUENT 有如下几个启动方法：

- 在命令行启动适当的版本；
- 在命令行启动，但是不指定版本，然后在面板上选择适当的版本；在命令行启动，但是不指定版本，然后读入 case 文件（或者 case 文件和数据文件）来启动适当的版本。

命令行启动适当版本：可以指定维度和精度：fluent 2d 运行二维单精度版本；相应的 fluent 3d；fluent 2ddp；fluent 3ddp 都分别运行相应的版本。并行版本的启动请参阅相关的并行版本启动方法在此不予介绍。

在解算器的面板中指定版本

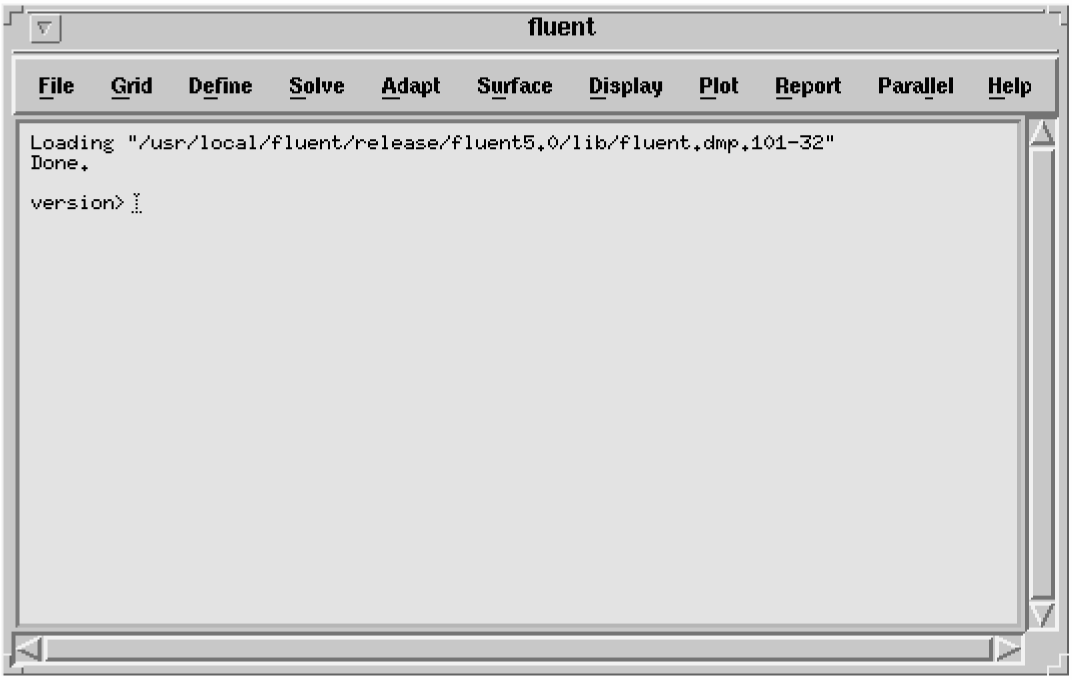


Figure 1:启动时的控制台窗口

在版本提示中健入 2d、3d、2ddp 或者 3ddp 启动相应版本。

如果是在图形用户界面（GUI）中启动适当的版本，请选择 File/Run...菜单，然后将会出现如下图所示的菜单，这样你就可以选择合适的版本了(你也可以在这个面板上启动远程机器上的 FLUENT 或者并行版本，详细的内容请参阅相关主题

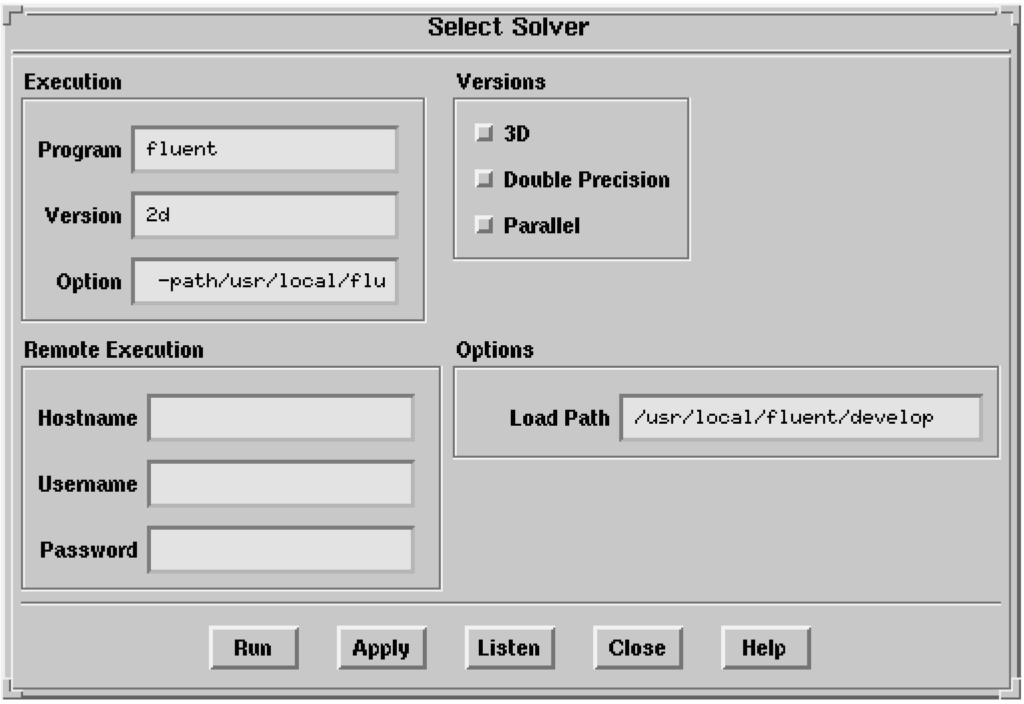


Figure 2: FLUENT 可以在选择结算器的面板上启动适当的版本

在面板上启动解算器一般遵循如下方法：

1. 开关 3D 选项指定 3D 还是 2D 解算器
2. 开关双精度选项启动双精度或者单精度解算器

3. 点击 Run 按钮

如果可执行程序不在你的搜索目录下，你可以在点击 Run 之前指定完全的文件名。

读 Case 文件指定解算器版本：

启动时如果未指定版本（在命令行输入 fluent），将会出现前面所看到的控制台窗口，在 File/Read/Case.. 或者 File/Read/Case & Data..菜单中择适当的 case 文件或者 data 文件，我们就可以启动适当的版本了。（详细内容型参阅“读写 case 和 data 文件”部分）。当然也可以在版本的文本菜单中用 read-case 或者 read-case-data 命令。File/Read/Case & Data...菜单或者 read-case-data 命令中读入的 case 和 data 文件具有相同的名字，而且扩展名分别为.cas 和.dat.。

在 Windows NT 中启动 FLUENT 有几种方法，下面做一介绍

Windows NT 4.0 中有两种方法启动 FLUENT:

开始菜单——程序菜单——Fluent.Inc（安装时可以改名）菜单——点击 FLUENT 6
在 MS-DOS 命令提示符中键入 fluent 2d、fluent 3d、fluent 2ddp 或者 fluent 3ddp 启动相应版本。需要注意的是，进行上述步骤之前你要设定用户环境以便于 MS-DOS 可以找到 fluent。你可以遵照如下做法：选择程序组的"Set Environment"，该程序会将 Fluent.Inc 目录加入到你的命令搜索行。

在 MS-DOS 命令提示符中你也可以启动并行 FLUENT。在 n 个处理器上运行并行版本，键入 fluent-version-tn（tn 在 2d, 3d, 2ddp,或者 3ddp 之后），n 为处理器的个数。比如：fluent 3d -t3 表示在 3 个处理器上运行 3D 版本)，详细内容请参阅并行处理部分

在 Windows NT 3.51 上运行：有两个方式启动 FLUENT

鼠标双击 FLUENT 5 程序图标

MS-DOS 方式的方法同上

启动选项

启动解算器之前要想知道版本信息，你可以键入 fluent –help 命令，下面是该命令的选项：格式：fluent [version] [-help] [options]

options： -cl following argument passed to fluent,
- -cxarg following argument passed to cortex,
- -cx host:p1:p2 connect to the specified cortex process,
- -driver [gl | opengl | null | pex | sbx | x11 | xgl],
  sets the graphics driver (available drivers vary by platform),
- -env show environment variables,
- -g run without gui or graphics,
- -gu run without gui,
- -gr run without graphics,
- -help this listing,
- -i journal read the specified journal file,
- -nocheck disable checks for valid license file and server,
- -post run a post-processing-only executable,
- -project x write project x start and end times to license log,
- -r list all releases,
- -rx specify release x,
- -v list all versions,
- -vx specify version x,

-n　　　no execute,

-hcl　　following argument passed to fluent host,

-loadx　start compute nodes from host x,

-manspa manually spawn compute nodes,

-ncl　　following argument passed to fluent compute node,

-px　　　specify parallel communicator x,

-pathx　specify root path x to Fluent.Inc,

-tx　　　specify number of processors x,

在 Windows NT 系统中，只有-driver, -env, -gu(有限制), -help, -i journal, -r, -rx, -v, -vx, 和-tx 可用。

前三个选项是用来指定 FLUENT 和 Cortex 的声明的。Cortex 为用户提供界面和 FLUENT 图形窗口的程序。选项-cx host:p1:p2 只用于手动启动解算器的情况。

如果你输入 fluent –driver，你可以指定解算期间的图形驱动器（如：fluent -driver xgl）。输入 fluent –env 将会在 FLUENT 运行之前列出所有环境变量。命令 fluent –g 将会运行 Cortex 而没有图形窗口与图形用户界面。如果你不是用 X-Windows 显示或者你想提交一份批处理任务这一选项十分有用。命令 fluent –gu 将会运行 Cortex 而没有图形用户界面。命令 fluent –gr 将会运行 Cortex 而没有图形。(在 Windows NT 系统中，命令 fluent –gu 会以图标的形式运行 FLUENT，如果你去图标化，就会得到图形用户界面。这一选项用于和-i journal 选项连接以后台模式处理任务

要启动解算器并立即读入日志文件，输入 fluent -i journal，journal 为所要读入的日志文件名。选项-nocheck 加速了启动过程但不检查许可证服务器是否运行。这一功能在你知道许可证服务器已经运行时或者你根本就不想启动许可证服务器时（比如说：你根本就没有权力启动它）是很有用的。命令 fluent –post 将会运行一个解算器的版本，它可以允许你设定问题，或者进行后处理过程，但是不允许你进行计算。

选项-project x 允许你对每一个工程分别记录 CPU 的时间。如果通过键入-project x（x 是工程的名字）开始一项工作，与 CPU 事件有关的信息会记录在许可证管理的 log 文件中。要确定某项工程的 CPU 时间，将 license.log 文件中的 USER CPU 和 SYSTEM CPU 值加起来即可。

输入 fluent version –r（其中 version 为版本号），将会列出指定版本的所有版本号。选项 fluent –rx 运行 FLUENT 的 x 版本。当然你也可以输入 fluent –v 此时可以列出所有的版本号，然后指定版本。你可以输入 fluent –n 或者在任何其它的连接词中使用-n 选项，来查看可执行程序在哪里而不必运行它。

剩下的选项是和并行计算有关的。选项-hcl 用于通过 FLUENT 主机过程的声明，选项-ncl 用于通过 FLUENT 计算节点的声明，选项-loadx 用于远程前端机器的并行机器上启动并行计算节点过程，选项-manspa 用于取消默认的计算节点过程产生，选项-px 指定了并行通信装置 x 的使用，其中 x 是运行于多处理器 UNIX 机器上的任何一个通信装置，选项-pathx 指定了 Fluent.Inc 安装的根目录，选项-tx 指定了所使用的 x 处理器，关于启动并行版本的 FLUENT 的更多信息，请参阅解算器的并行版本的启动。

解算器中用户可以选择的输入

选择解的格式

FLUENT 提供三种不同的解格式：分离解；隐式耦合解；显式耦合解。三种解法都可以在很大流动范围内提供准确的结果，但是它们也各有优缺点。分离解和耦合解方法的区别

在于，连续性方程、动量方程、能量方程以及组分方程的解的步骤不同，分离解是按顺序解，耦合解是同时解。两种解法都是最后解附加的标量方程（比如：湍流或辐射)。隐式解法和显式解法的区别在于线化耦合方程的方式不同。详情请参阅相关章节。

分离解以前用于 FLUENT 4 和 FLUENT/UNS，耦合显式解以前用于 RAMPANT。分离解以前是用于不可压流和一般可压流的。而耦合方法最初是用来解高速可压流的。现在，两种方法都适用于很大范围的流动(从不可压到高速可压)，但是计算高速可压流时耦合格式比分离格式更合适。

FLUENT 默认使用分离解算器，但是对于高速可压流（如上所述），强体积力导致的强烈耦合流动(比如浮力或者旋转力)，或者在非常精细的网格上的流动，你需要考虑隐式解法。这一解法耦合了流动和能量方程，常常很快便可以收敛。耦合隐式解所需要内存大约是分离解的 1.5 到 2 倍，选择时可以通过这一性能来权衡利弊。在需要隐式耦合解的时候，如果计算机的内存不够就可以采用分离解或者耦合显式解。耦合显式解虽然也耦合了流动和能量方程，但是它还是比耦合隐式解需要的内存少，但是它的收敛性相应的也就差一些。

注意：分离解中提供的几个物理模型，在耦合解中是没有的：多项流模型；混合组分/PDF 燃烧模型/预混合燃烧模型/Pollutant formation models/相变模型/Rosseland 辐射模型/指定质量流周期流动模型/周期性热传导模型。

用户选择解的格式：点击菜单 Define/Models/Solver..弹出下面图框，选择所需要的格式即可。

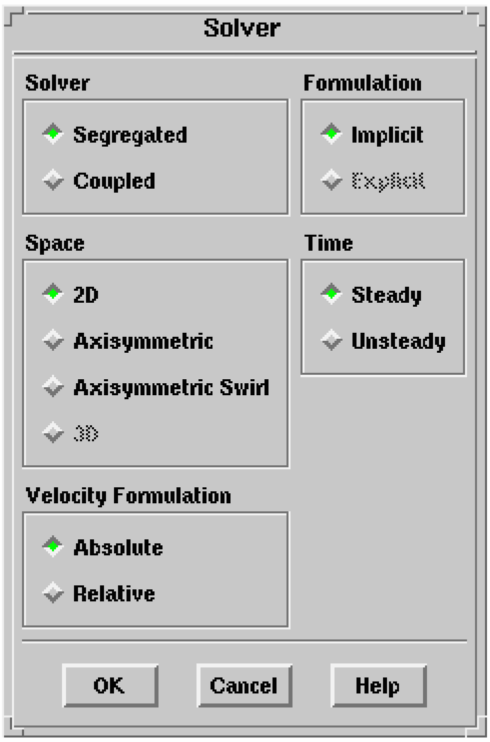


Figure 1:解算器控制面板

算例

为了演示 FLUENT 的问题解决和后处理能力，你可以用 CD 上提供的网格文件解决一个很简单的问题。所要解决的问题请看下图。在该问题中 a cavity in the shape of a

60^?rhombus, 边长 0.1 米，内部为常密度空气，上部是一个速度为 0.1m/s 向右运动的壁面，雷诺数大约为 500，流动是层流。

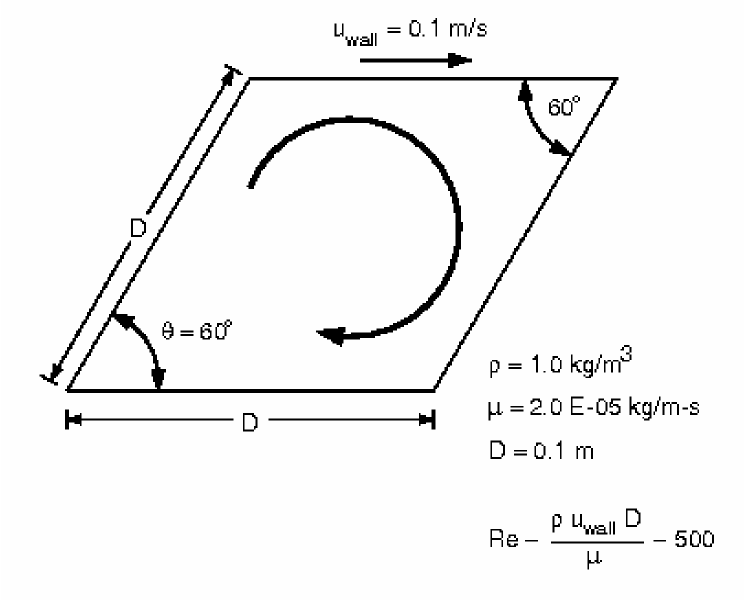


Figure 1: 驱动腔内的流体流动

程序概要

上述问题是一个简单的二维问题，流动为层流，无热传导，不需考虑特殊的物理模型，除此之外，所有的问题，如几何图形，网格，边界位置和类型已经在网格生成的时候定义了。你只需读入网格文件就可以读入全部信息了。

本问题模拟的步骤简化为：读入并检查网格，选择默认的分离解，定义物理模型，指定流体性质，指定边界条件，保存问题的设置，初始化解域，计算解，保存结果，检查结果。.

在开始之前把安装 CD 上的/fluent_inc/fluent5/tut/sample/cavity.msh 网格文件复制到工作目录。读入网格：点击菜单 File/Read/Case...弹出下面的对话框

一般说来，一个 case 文件包括网格，边界条件和解的控制参数。网格文件是它的子集，本算例中的网格已经保存为 FLUENT 的格式了，所以可以像读入其它 case 文件一样来读入它。（如果网格文件是其它格式，请选择菜单 File/Import）

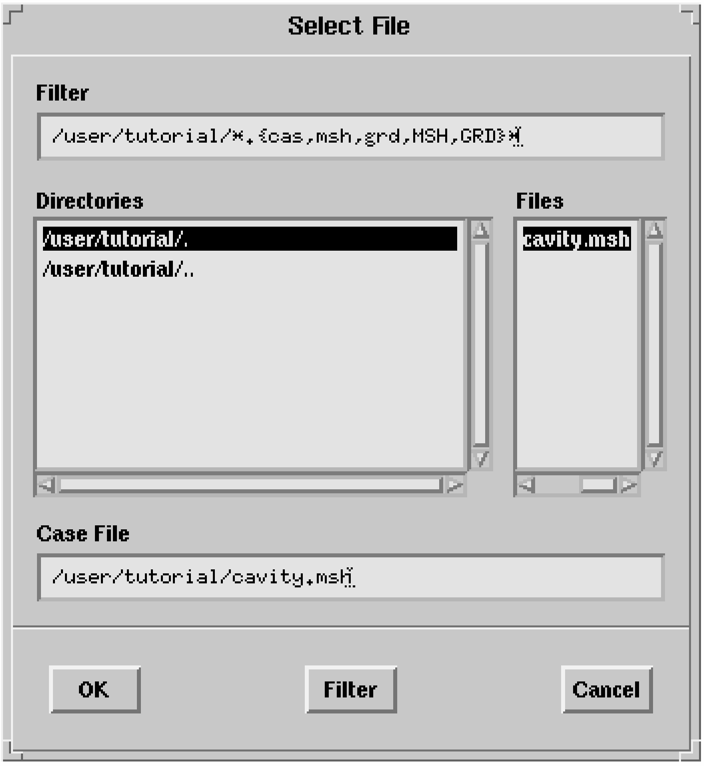


Figure 1: 读入网格

在上图中选择所需文件，双击便可读入。本例中选择了 cavity.msh 文件。FLUENT 在读网格的过程中会在控制台窗口显示进程。

检查网格

读入网格之后要检查网格：菜单 Grid/Check。在检查过程中，你可以在控制台窗口中看到区域范围，体积统计以及连通性信息。具体显示内容如下：

Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 1.500000e-01
y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 8.660000e-02
Volume statistics:
minimum volume (m3): 7.156040e-05
maximum volume (m3): 7.157349e-05
total volume (m3): 8.660000e-03
Face area statistics:
minimum face area (m2): 9.089851e-03
maximum face area (m2): 9.091221e-03
Checking number of nodes per cell.
Checking number of faces per cell.
Checking thread pointers.
Checking number of cells per face.
Checking face cells.
Checking face handedness.
Checking element type consistency.

Checking boundary types:
Checking face pairs.
Checking periodic boundaries.
Checking node count.
Checking nosolve cell count.
Checking nosolve face count.
Checking face children.
Checking cell children.
Done.

网格检查是最容易出的问题是网格体积为负数。如果最小体积是负数你就需要修复网格以减少解域的非物理离散。你可以在 Adapt 下拉菜单中选中 Iso-Value...来确定问题之所在，其它关于网格检查的信息请参阅“网格检查”一章。

显示网格：菜单为 Display/Grid...。

在网格显示面板（下图）点击 Display 按钮便会打开图形显示窗口并画出网格，你将会看到下面第二个图所示的内容。

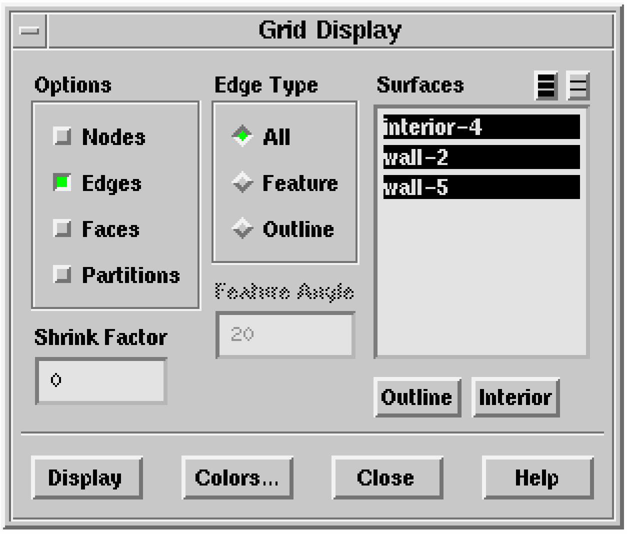


Figure 1: 网格显示面板

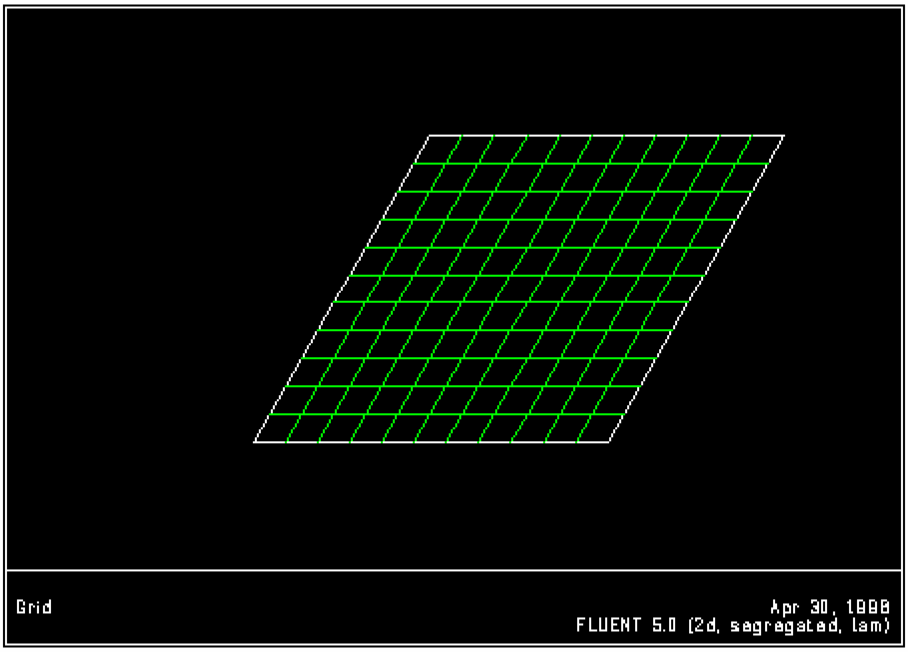


Figure 2: 默认视角的网格显示

该图可以用鼠标控制放大或缩小，用鼠标圈住的内容松开鼠标之后该内容就会在窗口内满屏显示。

选择解算器的具体格式

对于本问题，速度很小，可以假定为不可压流，所以使用分离解算器很合适。分离解算器是 FLUENT 默认的解算器，不需改变。如果你要选择一个耦合解算器，请参考在 Define/Models 菜单中的 Solver 面板。

定义物理模型

FLUENT 中默认物理模型是层流流动，本例是层流，不需修改模型的设定。如果你需要修改物理模型，则需要 Define/Models 子菜单中的粘性模型面板以及其它面板。

指定流体物理性质

选择菜单：Define/Materials...得到如下对话框

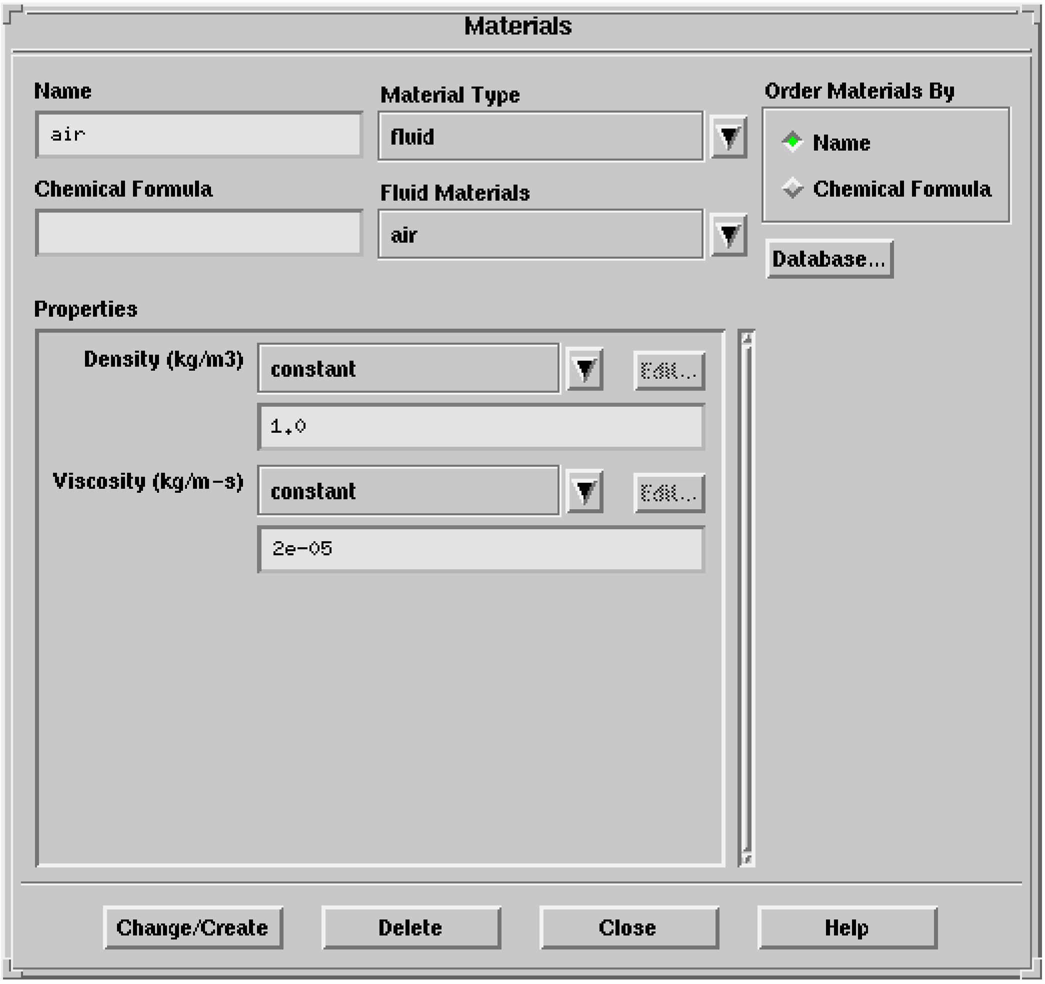


Figure 1:材料控制面板

如果不使用空气，可以在材料数据库中选择其它气体，或者创建自己的材料数据。对于这个问题，需要对空气的性质做一些修改：密度为 1.0 kg/m^3，粘性为 2*10^-5 kg/m-s，点击 Change/Create 保存然后关闭面板。

指定边界条件

设定边界条件的数值与类型，使用菜单 Define/Boundary Conditions...得到下图

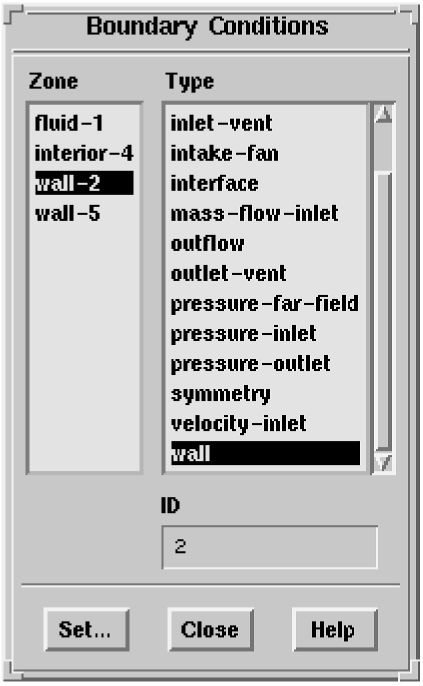


Figure 1: 边界条件面板

设定边界条件，首先在区域列表中选择，然后在类型列表中修改该区域的类型，确定完类型之后就可以点击 Set...按钮(双击区域名字和点击 Set...按钮具有相同功能) 。

对于本问题，移动壁面的边界条件需要改为 x 方向速度 0.1 m/s。如果你不能确定哪一个是移动壁面，你可以在图形窗口的上壁面边界点击鼠标右键（该图形窗口仍然显示图 2 所示的网格），区域信息便会在 FLUENT 控制台窗口上显示出来，而且 wall-2 会在边界面板的区域列表中自动被选上。现在点击 Set...按钮便可以弹出下面图框：

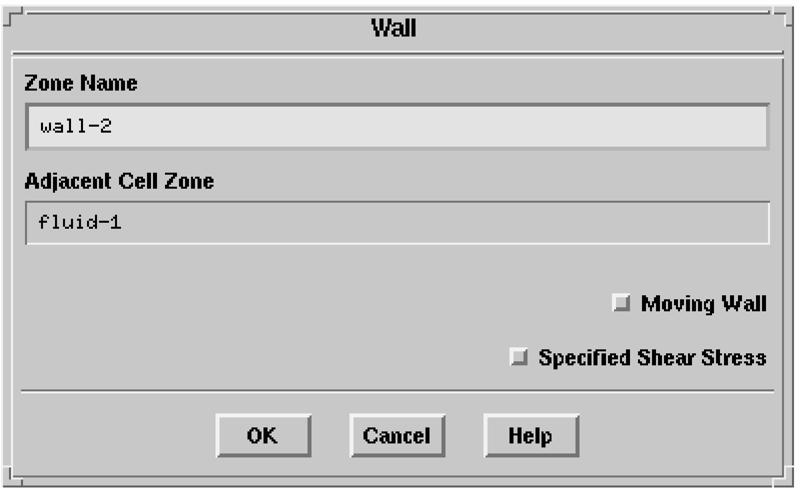


Figure 2: 壁面面板

选择 Moving Wall 选项便可以得到下面图框，从而设定壁面速度了。速度方向默认为 X 向，所以只需设定速度大小为 0.1(注意：邻近的流体区域并没有运动，如果你模拟的是旋转参考系，你不必担心相对运动和绝对运动的设定，它们是等价的。

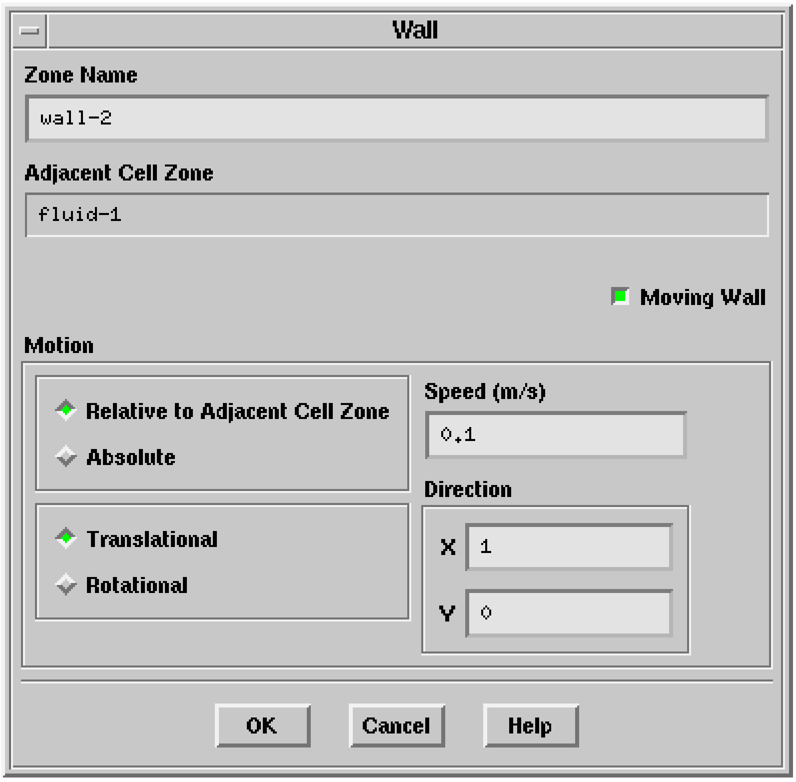


Figure 3: 移动壁面的壁面面板

输入数值之后，点击 OK 保存设定，关闭面板。

本问题的其它边界都是空腔的其它三个边的壁面边界条件(wall-5)。本例使用默认边界条件——静止边界条件。到此为止，边界条件设定完毕。

调整解的控制

在 Solve/Controls 子菜单中打开的面板里，你可以改变压松弛因子、多网格参数以及其它流动参数的默认值。在使用解算器一章可以找到它们的详细设定，一般说来这些参数不需要修改。对于本问题来说默认的设定已经足够

激活残差图（Residual Plotting）：点击菜单 Solve/Monitors/Residual...，在选项中，打开 Plot 选项激活残差图形，然后点击 OK，从而可以在计算过程中查看残差。

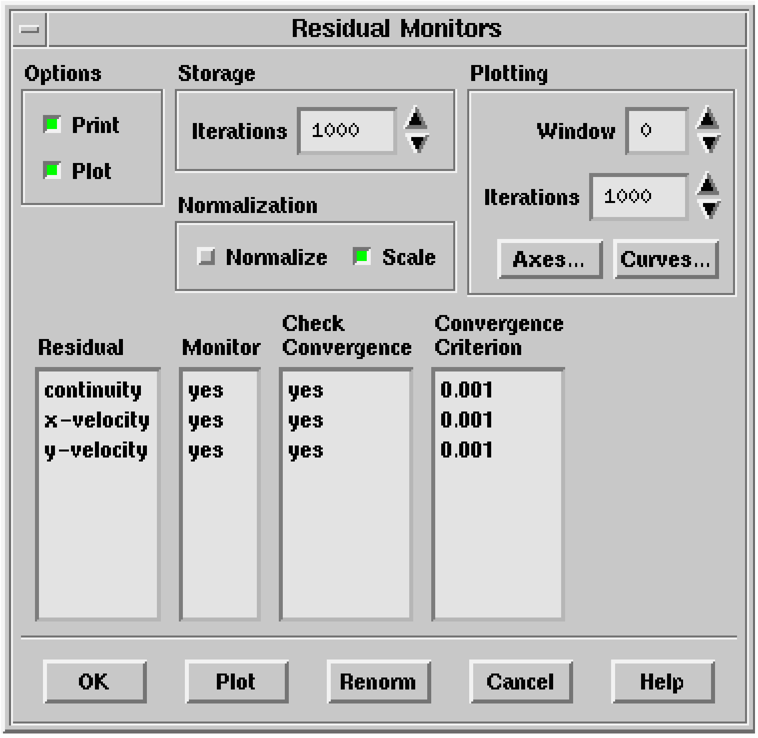


Figure 1: 残差监测面板

保存 Case 文件

有关问题定义的输入保存在 case 中，为了以后继续分析，你必须保存该文件（计算结果会保存在另一个 data 文件中）。选择 File/Write/Case...菜单，弹出下面对话框，保存 case 文件。

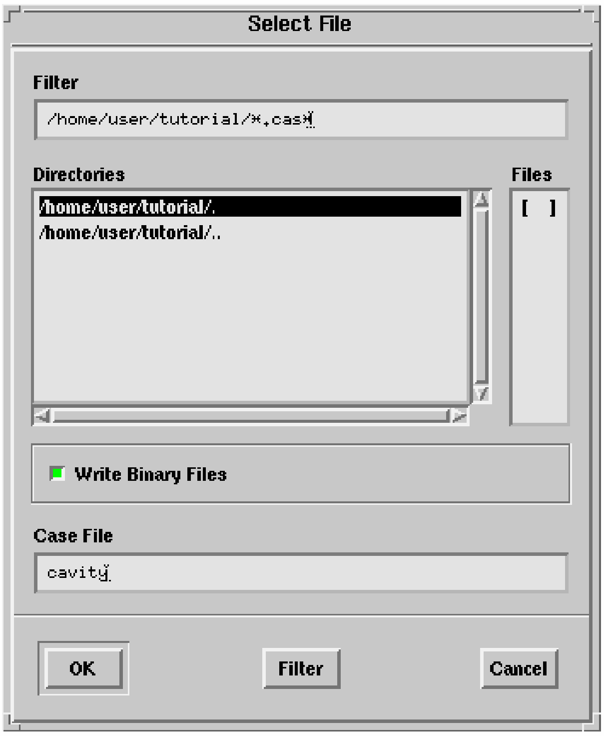


Figure 1:保存一个 Case 文件
输入文件名，FLUENT 会自动添加相应的扩展名，点击 OK 保存文件 cavity.cas。

解决问题

流场初始化

迭代之前你需要初始化流场提供一个初始解。你可以从一个或多个边界条件算出初始解，也可以分别输入流场的数值，相应菜单为 Solve/Initialize/Initialize...，点击得到 Figure 1. 虽然流动极为可能发展为强烈的循环流，所有的初值都为 0 也是可以的，因此你可以保持默认值不变，初始化流动，点击 Init 按钮，然后关闭面板

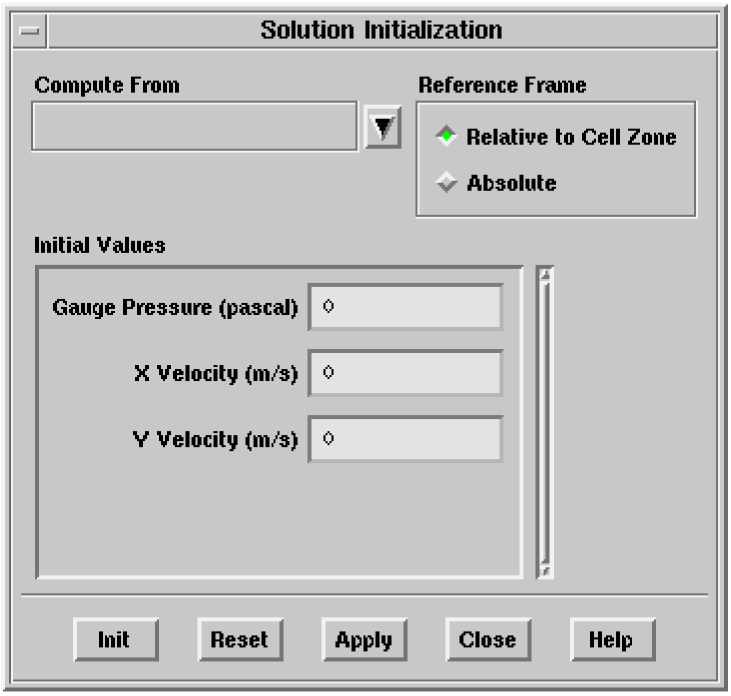


Figure 1:解的初始化面板

计算

现在可以迭代了，选择 Solve/Iterate...菜单，打开下图

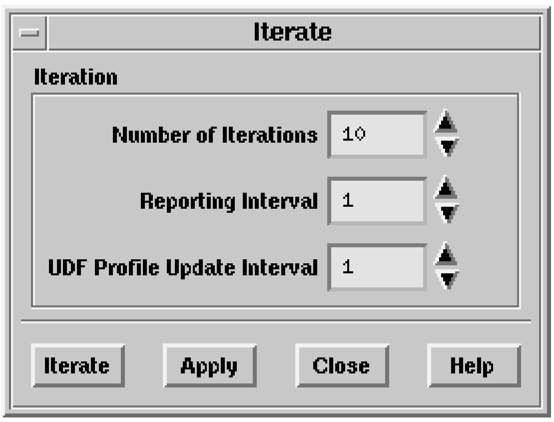


Figure 1: 迭代面板

在迭代按钮处的对话框中输入 10，表示迭代 10 步。迭代开始之后，你应该察看图形窗口中的残差图。迭代之后，你的图形窗口应该像下图一样。残差由上向下逐渐减少，这是很好的标志。对于不同的机器残差只会有稍微的不同，所以你的图形不一定和下图完全相同。

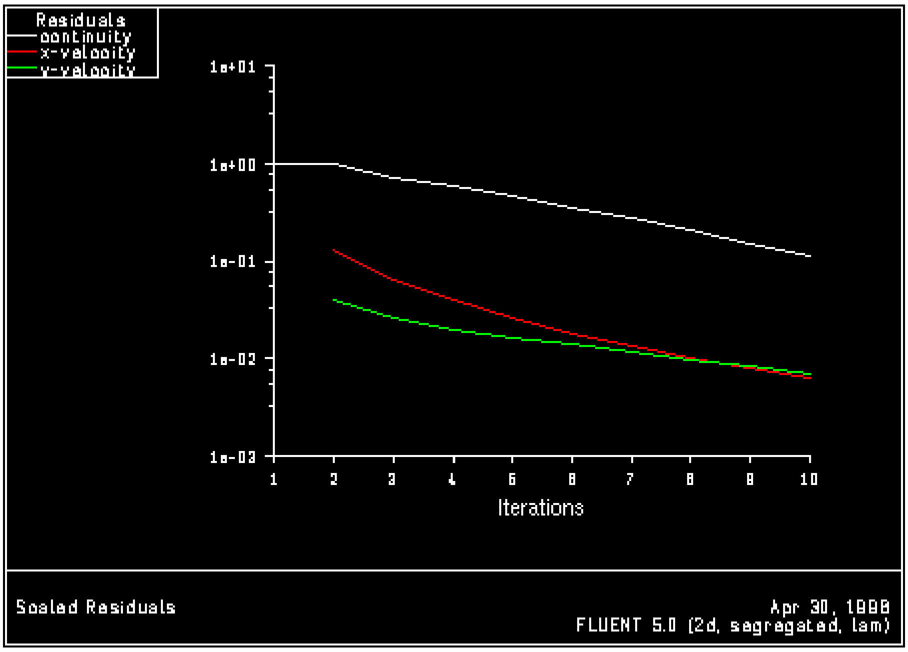


Figure 2: 10 次迭代之后的残差图

你可能也想检查流场，看它怎么发展。打开 Display/Velocity Vectors..菜单，弹出下面的速度矢量面板的图框

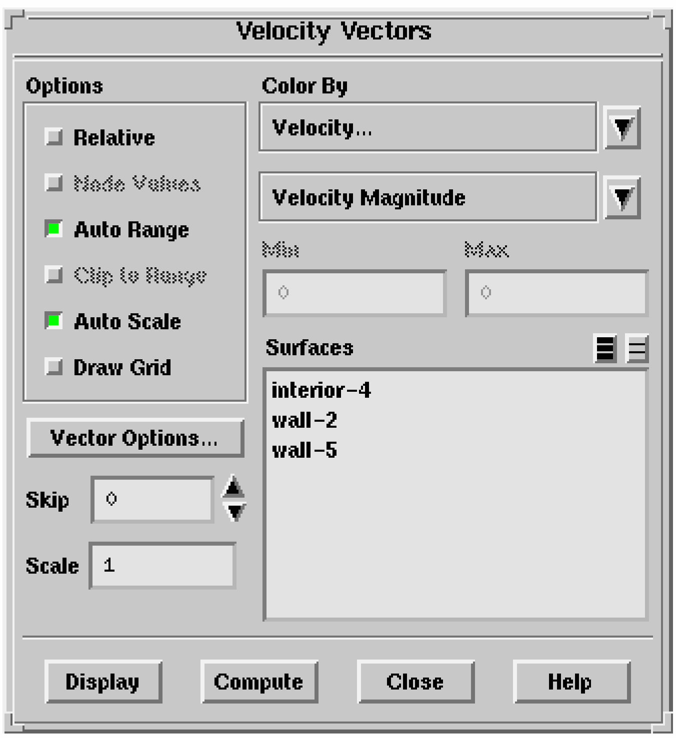


Figure 3: 速度矢量面板

此面板内的默认设定将会产生一个由速度大小标记颜色的矢量图，点击 Display 按钮得到下图：

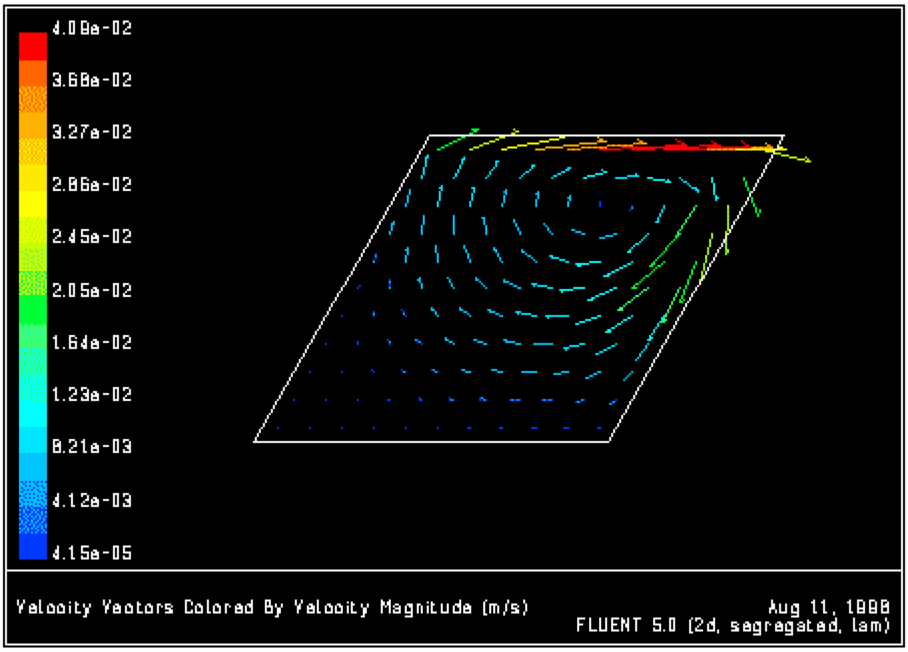


Figure 4：10 步迭代之后的速度矢量

即使是 10 次迭代，旋转的图像已经很清晰了。看来该解的过程是可以接受的，我们可以增加迭代步骤完成该解。迭代 90 步时，你会发现在大约在第 50 步，迭代解就已经收敛到允许的误差范围了。在这个时候，残差图应该像下图一样，需要注意的是，不同的机器所需的收敛步是不同的。

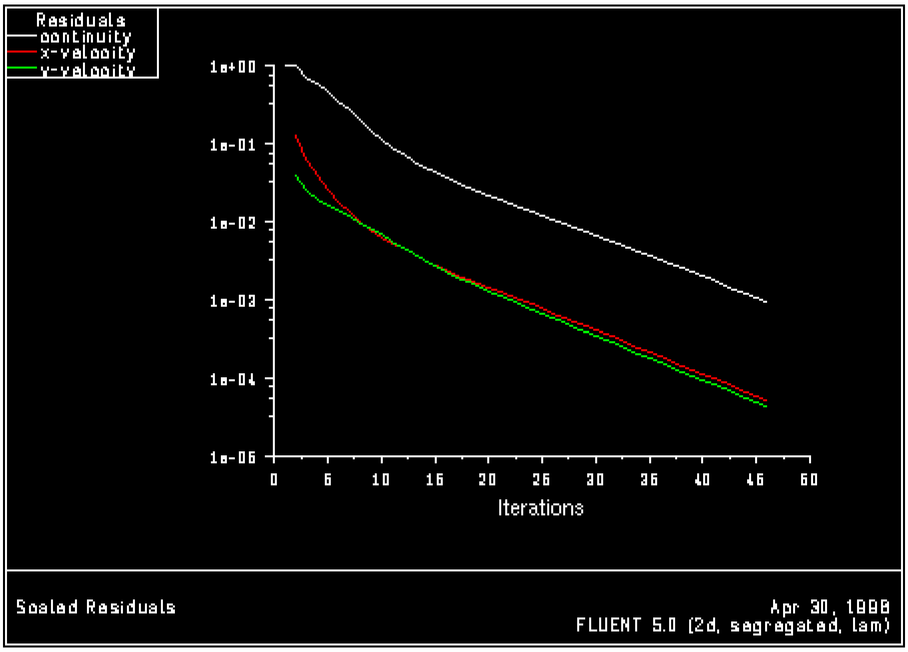


Figure 5: 收敛之后的残差

现在可以保存数据察看收敛结果了。

保存结果

如前所述，case 文件保存之后，问题的定义和 fluent 计算结果分别保存在 case 文件和 data 文件中。必须保存这两个文件以便以后重新启动分析。注意：FLUENT 不会自动保存这些文件，虽然在开始计算之前你已经保存了 case 文件和 data 文件，但是最好再保存一下。

保存 case 文件和 data 文件，选择 File/Write/Case & Data... 菜单，弹出下面的对话框

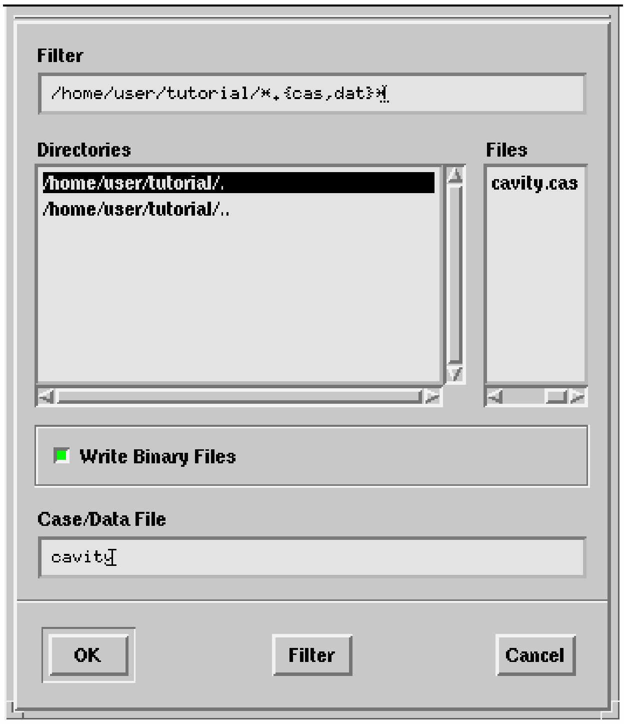


Figure 1: 保存 case 和 data 文件

在 Case/Data 文件窗口输入文件名，FLUENT 会自动添加相应的扩展名.cas 和.dat 在上图中你输入 cavity 作为文件名，FLUENT 会自动保存 case 文件为 cavity.cas，data 文件为 cavity.dat 输入文件名之后点击 OK 保存，如果 cavity.cas 已经存在，FLUENT 将会询问是否覆盖它，点击 OK 写入文件即可。

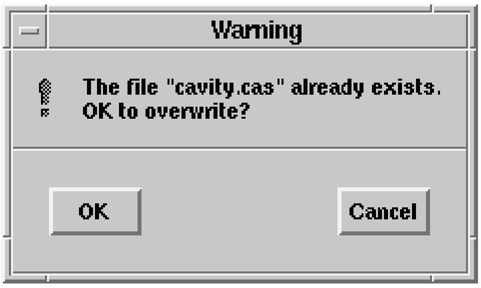


Figure 2：确认覆盖

注意：在结束进程之前，你可以启动新的 FLUENT 进程，读入 case 文件和 data 文件，重新分析和修改算例。

检查结果——画等值线

前面画过速度矢量图，现在在 Display /Contours...中打开等值线面板如下图：

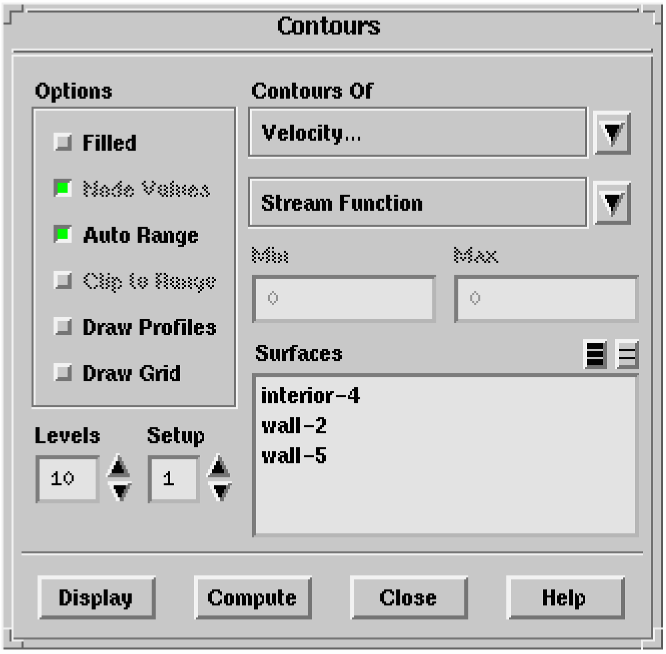


Figure 1: 等值线面板

在上面的“Contours Of”下拉菜单中选择 Velocity...然后选择 Stream Function，将等值线的 Levels 设为 10 点击 Display 按钮，显示结果如下。看完了别忘了关掉。

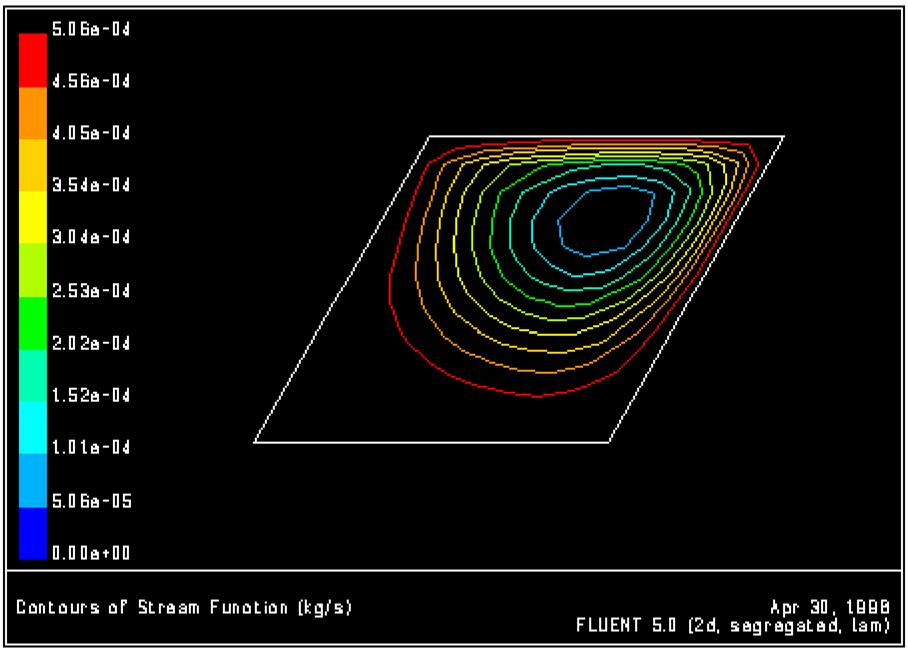


Figure 2:流函数等值线

从 FLUENT 退出

检验结果并保存算例和数据文件之后就可以在文件菜单的 Exit 选项中退出 FLUENT 了。

总结

本例使用 FLUENT 解决了一个非常简单的问题。该教程在后面将详细叙述 FLUENT 物理模型和解参数的问题以解决更为复杂的问题。

Fluent 用户界面

赵玉新（国防科技大学航天学院）

注意：本资料只用于学习心得的交流，未征得 Fluent 和海基公司的同意，如果涉及版权问题，请于作者联系

FLUENT 包括下拉菜单，面板和对话框还包括文本命令行的界面。本章详细介绍了上述几个部分的使用方法及相应功能。

图形用户界面(GUI)

它由控制台窗口，控制面板，对话框以及图形窗口组成。下图就是典型的 fluent 界面。上述四个部分将在下面详细介绍。在 UNIX 系统中，GUI (包括颜色和字体)可以自定义以适合操作系统的环境。

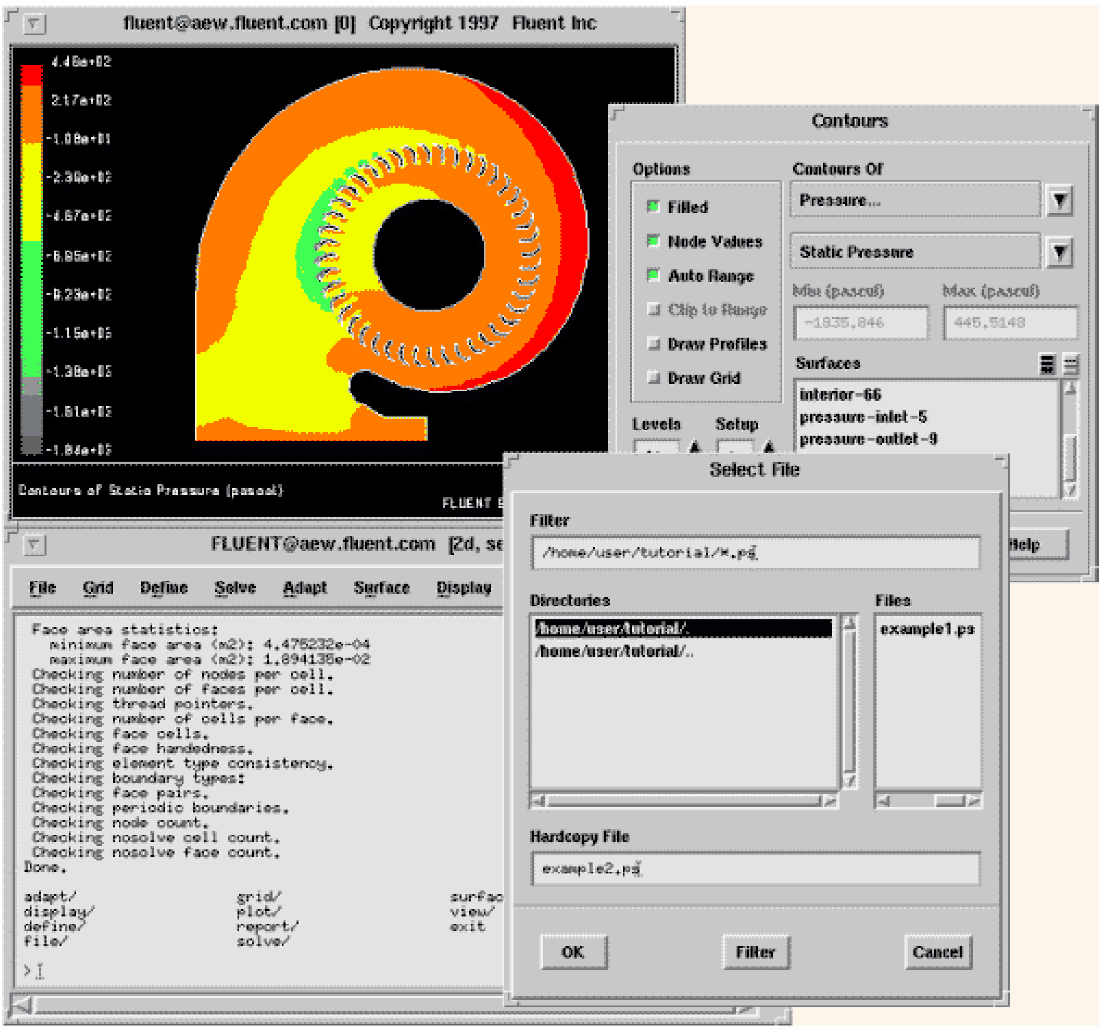


Figure 1:屏幕显示的 GUI 各部分

控制台（Console）

FLUENT 控制台是控制程序执行的主窗口。用户和控制台之间有两种交流方式：文本界面(TUI)，图形界面(GUI)。控制包括终端仿真程序和菜单按钮的图形界面。

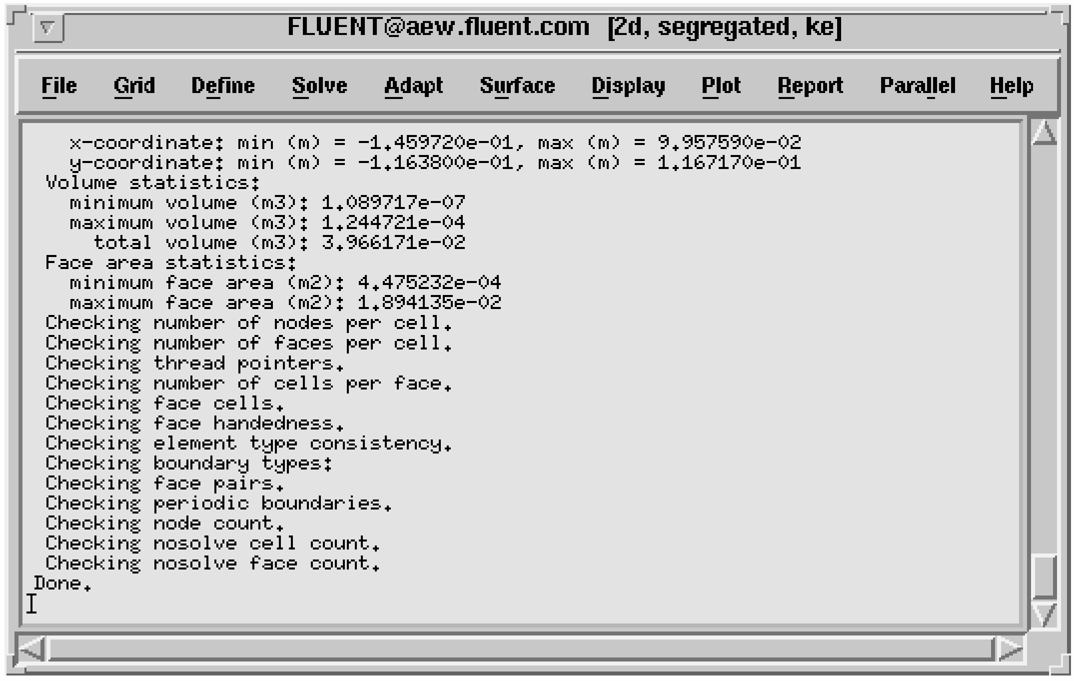


Figure 1: 控制台

终端仿真程序

终端仿真程序和 MS-DOS 命令提示符类似，它使你能够和 TUI 菜单交流。所有的文本都输出到终端仿真程序，所有的输入都从最底行开始。快捷键 Control-C 可以暂停正在计算的程序。它也支持控制台和其它 X Window 或 Windows NT 应用程序之间文本的复制和粘贴。下面是 UNIX 系统中复制和粘贴的方法：

1．鼠标左键选中要复制的东东
2．到新窗口点击中键便可粘贴

下面是在 Windows NT 系统中复制文本到剪贴板的方法：

1．选中文本
2．Ctrl+Insert

菜单按钮

菜单按钮用下拉菜单组织图形界面的层次，下图就是下拉菜单的外观

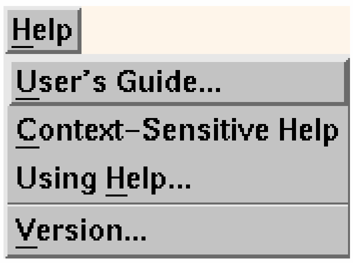


Figure 1:Help 下拉菜单

FLUENT 下拉菜单使用方法和 Windows 的一样。快捷方式也一样——Alt，然后下划线

字母选中，ESC 键退出。有些下拉菜单有快捷键，在相应的菜单后面会提示快捷键是什么，自己去找就可以了。

对话框

对话框用于完成简单的输入输出任务，比如说警告、错误和询问。对话框是临时窗口，出现时要注意，你对它作出选择之后关闭就可以做其它工作了。

下面是几种对话框

信息提示框



信息提示框告诉我们需要知道的信息，点击 OK 就关闭了

警告对话框



警告对话框用于警告某些潜在问题，并询问是否继续当前操作，

错误对话框



工作对话框



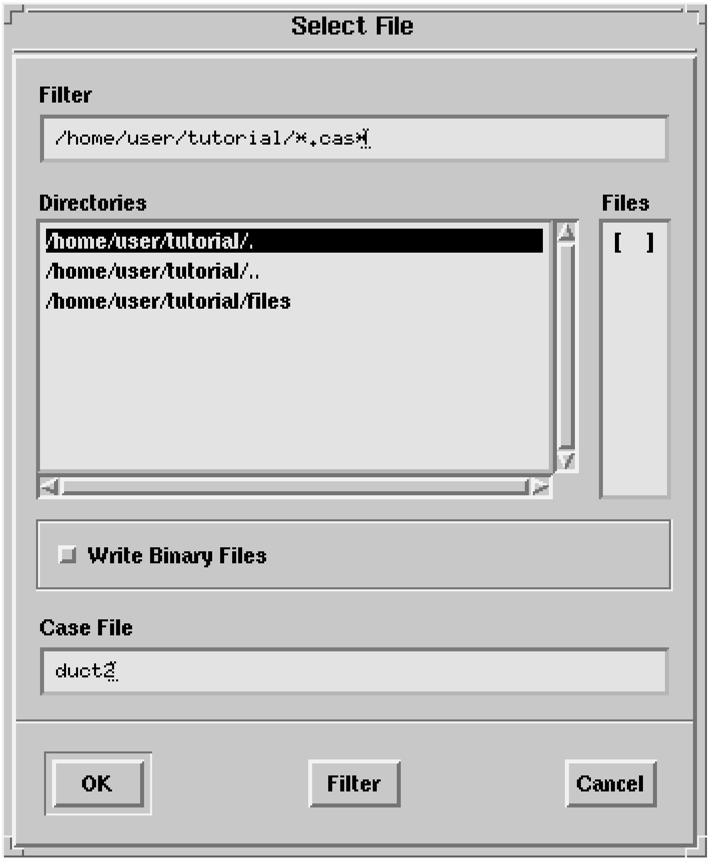
工作对话框显示正在进行的任务，这是一个特殊的对话框，你唯一的操作就是干掉它，否则它不需要你进行任何操作，只告诉你——等待吧!! 程序结束它也自动关闭了。

问题对话框



阅读，决定之后选择就可以了

文件选择对话框



文件选择对话框并不是完全一成不变，上面的是较为常见的，在用 XY 绘图读入外部数据文件时的文件对话框如下：



文件选择的步骤如下：

1. 找到适当的目录，两种方法：在 Filter 中输入路径，按回车键，要保证最后一个字符是"/" ；双击一个目录，然后子目录……，Filter 按钮和双击的功能一样。注意"."表示当前目录，".."表示父目录
2. 在文件列表中指定文件名，或者输入文件名。注意：*.dat*表示扩展名为 dat 的文件，只输入*表示所有文件。
3. 如果你是读入多重 XY-plot data 文件，所选的文件将被加入到 XY 文件列表中 File(s)。选错了文件的话你可以点击所选错的文件然后点击 Remove 按钮。
4. 如果你用 Write Binary Files 按钮选择二进制或文本文件来写 case、data 或者 radiation 文件。你可以阅读和编辑文本文件，但是它比二进制文件需要更多的存储空间，而且读写的速度较二进制文件慢
5. 点击 OK 按钮读写特定的二进制文件，这步的捷径如下。

如果文件出现在列表中并且所读的不是 XY 文件，双击文件就和点击 OK 按钮具有相同的功能。如果是 XY 文件你就不能够通过双击文件来打开它，而只能将它选入文件列表中。

如果输入的是文件名，按回车键和点击 OK 按钮具有相同的功能

Windows NT 系统的文件选择使用标准的 Windows NT 文件选择对话框。详细介绍可以参阅相关内容。

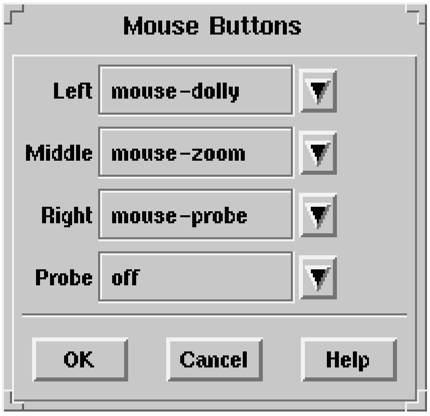
面板

面板用于处理复杂的输入任务。和对话框相似，面板也是一个独立的窗口，但是使用面板更像是填充一个表格。每一个面板都是独一无二的，而且使用各种类型的输入控制组成表

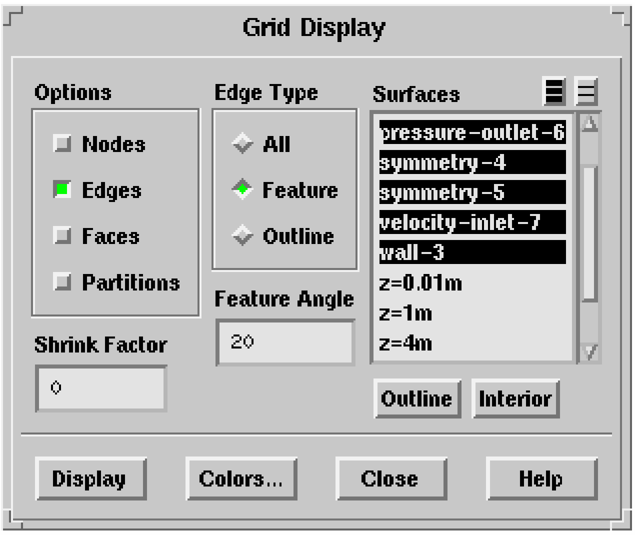
格。

在面板的控制下输入数据后，你需要应用所改变的设置，或者取消所改变的设置。具体的形式请看下面：

- 应用设置之后立刻关闭面板，这种面板有两个按钮：OK 应用设置并关闭面板；Cancel 关闭面板而且不做任何改变。如下图：



- 另一种面板是在你应用设置后仍然不关闭面板，这是我们可以很快的做更多的设置。后处理和自适应网格中经常会出现这样的面板。按钮功能为：Apply 应用设置不关闭面板，这一按钮经常也有其它的名称，比如后处理过程中该按钮的名字是 Display 自适应网格中这个按钮是 Adapt。Close 关闭面板。如下例：



所有的面板都包含 Help 按钮，用于显示如何使用面板的信息

面板中的各种类型输入控制如下：

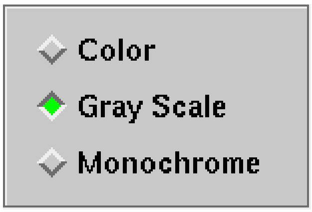
Push Button



Check Button

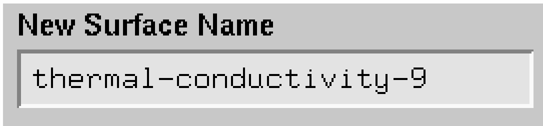


Radio Buttons



这类按钮中，只有一个选项可以打开。

Text Entry



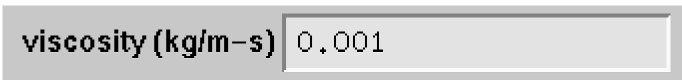
Integer Number Entry



一般说来用鼠标点击上下箭头，会增加或者减少 1。如果结合键盘点击一次鼠标就可以增加更多的数量。用法如下表：

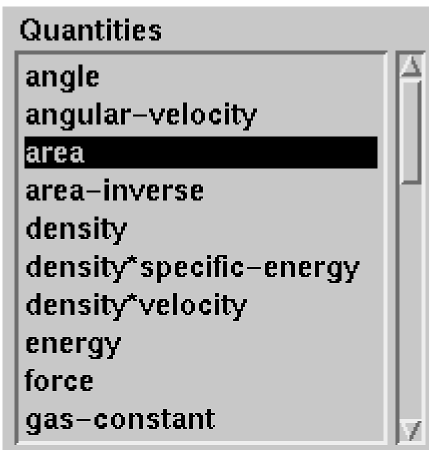
Key	Factor of Increase
Shift	10
Ctrl	100

Real Number Entry



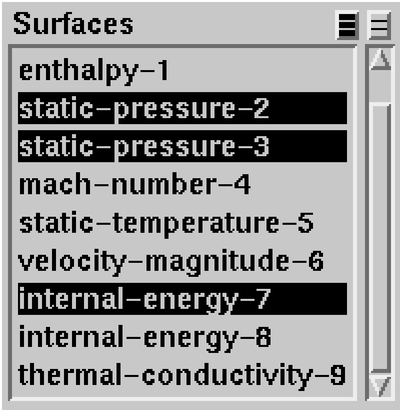
可以输入实数如 10, -10.538, 50000.45 和 5.e-4)，一般都会带有相应的单位。

单选列表



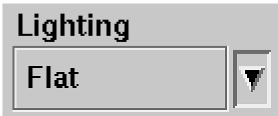
许多面板响应鼠标的双击功能，在实践中多试几次就熟练了

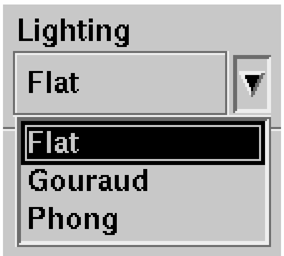
多选列表



鼠标点击一次选上；再点击一次取消选择

下拉菜单





使用方法和 Windows 的一样。

标尺



可以用鼠标操作，也可以用鼠标选择之后再用键盘左右选择

图形显示窗口

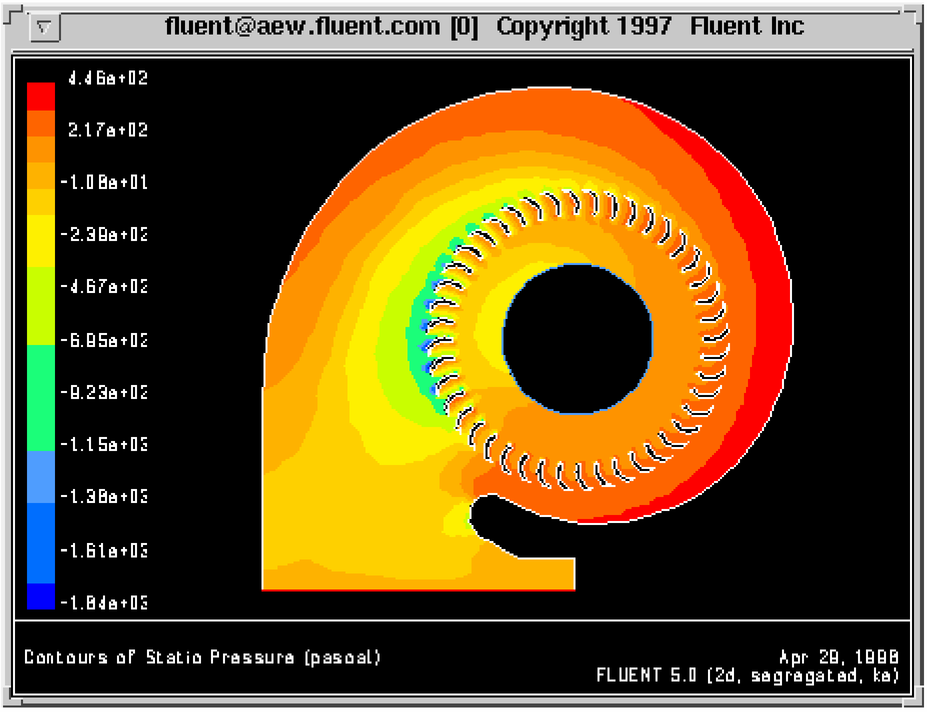


Figure 1: 图形显示窗口的例子

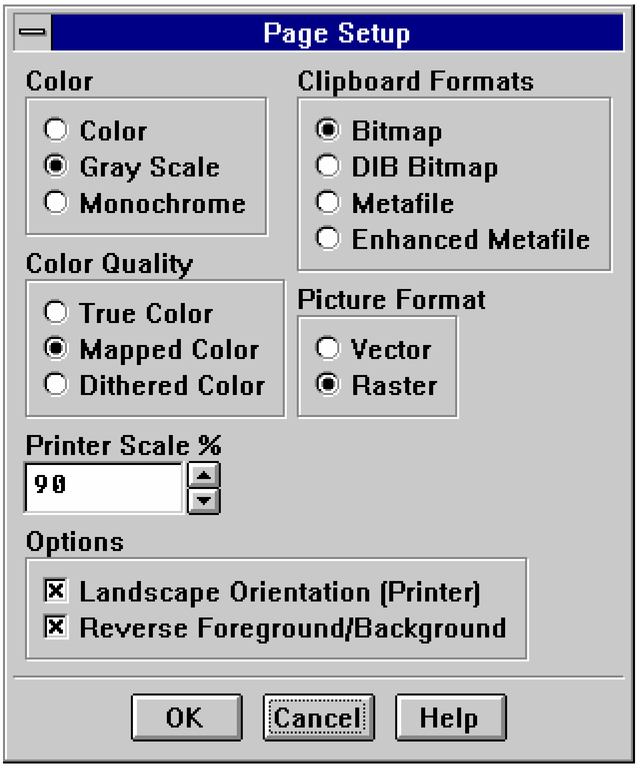
显示选项面板可以控制图形显示的属性也可以打开另一个显示窗口。鼠标按钮面板可以用于设定鼠标在图形显示窗口点击时所执行的操作。
当为图形显示处理数据时要取消显示操作可以按 Ctrl+C，已经开始画图的话就无法取消操作了。

输出图形显示窗口是 Windows NT 系统的特有功能，UNIX 系统没有此项功能。页面设置面板也是 Windows NT 系统独有的功能

Windows NT 系统的特有的输出图形显示窗口功能
如果你选择的是 Windows NT 版本的 FLUENT，点击图形窗口的左上角便可以显示图形窗口系统菜单，该菜单包括常用系统命令如：move，size 和 close。连同系统命令一起，FLUENT 为支持打印机和剪贴板增加了三条命令：

1. 复制到剪贴板：将当前图形复制到 Windows 的剪贴板。可以用页面设置面板改变复制的属性。图形窗口的大小影响了图形中所使用的字的大小。
2. 打印：将当前图形复制到打印机。可以用页面设置面板改变打印的属性。
3. 页面设置：显示页面设置面板。

Windows NT 系统独有的页面设置面板功能：在图形显示窗口的 system 菜单中点击 Page Setup..菜单，弹出页面设置面板如下：



第一个 Color：允许你选择是否使用彩色图

第二个 Color：选择彩色图形

Gray Scale：选择灰度比例图

Monochrome：选择黑白图

Color Quality：允许你指定图形的色彩模式

True Color： 创建一个由 RGB 值定义的图，这假定了你的打印机或者显示器有至少 65536 个色彩或无限色彩。

Mapped Color：用色彩图创建图形，这对于只有 256 色的设备是一个不错的选择

Dithered Color：用 20 个或更少的色彩创建一个颤动图

Clipboard Formats： 允许你选择所需格式复制到剪贴板。图形窗口的大小会影响剪贴板图形的尺寸。要得到最好的结果最好是调节图形窗口的尺寸并用 Windows 剪贴板查看器检查剪贴板图形。

Bitmap：图形窗口以位图形式复制

DIB Bitmap：是一个与设备有关的图形窗口位图复制

Metafile：是一个 Windows 图元文件

Enhanced Metafile：是一个 Windows 增强图元文件

Picture Format：允许你指定光栅和矢量图

Vector： 创建矢量图，这一格式在打印时有很高的清晰度，但是一些大的 3D 图可能会花很长时间来打印

Raster： 创建光栅图，这一格式在打印时有相对较低的清晰度，但是一些大的 3D 图可能会花较少时间来打印

Printer Scale %：控制打印图形覆盖页面的范围，减少尺度会有效的增加图形页面的空白。

Options：包括控制图形其它属性的选项

Landscape Orientation (Printer)：指定图形的方向。如果选上改选项，图形将会在前景

（landscape）模式中形成，否则是在肖像（portrait）模式下形成。改选项只在输出时应用。Reverse Foreground/Background：如果选定就会使图形的前景和背景颜色互换。这一功能可以使你复制白前景黑背景的图为黑前景白背景。

文本用户界面(TUI)

文本用户界面(TUI)使用被称为 Scheme 的 Lisp 专业用语，而且是用这一语言写成的。用户熟悉 Scheme 将能够使用界面的解释功能来创建自定义命令。（附注：Scheme 是 LISP 的一种方言。它不但设计非常干净，而且非常强大。它只有 7 种最基本的语法结构，1 种数据结构，甚至连循环语句都没有，但是它却有非常强大的宏，它可以自己扩展自己的语法，自己定义出循环语句，定义出各种其它语言可以见到的数据结构，定义出类，对象，……变成一个面向对象语言对它来说只是小菜一碟。 用 Scheme 编程序，你可以专注于设计算法本身，而不是为语言本身的比如内存泄漏之类的事情而烦恼。所以用这种语言教学，学生可以学会“解决现实世界的问题” 而不是困惑于 “电脑自己的问题”。Scheme 是很多大学，比如 MIT 的计算机系学生首选的编程入门语言，甚至有一个丹麦高中讲授这种语言。）

文本菜单系统

文本菜单系统为程序下的程序界面提供了分级界面。因为它是基于文本的，所以你可以用标准基于菜单的工具操作它：输入可以保存在文件中，用文本编辑器修改，并可以将执行的读入。因为文本菜单系统紧密地与 Scheme 扩展语言结合，所以它可以很容易的形成程序来提供复杂控制和自定义函数。

菜单系统结构和 UNIX 操作系统的目录树很相似。当你第一次进入 FLUENT，你是在根菜单下，菜单的提示符只是一个简单的补字符：“>”。
要生成子菜单和命令的列表只需键入回车：

```
>
adapt/          grid/          surface/
display/        plot/          view/
define/         report/        exit
file/           solve/
```

方便起见，子菜单的名字都以“/”结尾，以区别于菜单命令。要执行一个命令，键入命令名或该命令的简写就可以。与之相似，进入子菜单，只需键入菜单名字或其简写就可以，提示符也会相应改变为当前菜单的名字。

```
 > display
 /display> set
 /display/set>
```

要回到上一级菜单只需在命令提示中键入 q 或者 quit。

```
 /display/set> q  回车
 /display>
```

你可以键入菜单全路经名直接进入到另一菜单

```
 /display> /file
 /display//file>
```

在上一例中，控制直接从/display 转到/file 而不结束根菜单，因此，当你从/file 菜单退出时，

控制会直接退回到/display.

/display//file> q

/display>

而且，如果你直接执行一个命令而不结束路径上的任何菜单，控制会仍然回到你调用命令时的菜单。

/display> /file start-journal jrnl

Input journal opened on file "jrnl".

/display>

文本菜单系统为菜单命令提供了在线帮助，具体请见帮助界面介绍一节。

命令的缩写

选择菜单命令你不必输入全名；你可以输入匹配该命令的缩写。匹配命令的规则如下：命令由连字符分隔的短语组成。该命令与短语的初始序列匹配。连字符的匹配是可选的。短语和它的字符串的初始序列匹配，通过输入那个字符串来匹配。

如果一个缩写匹配多于一个命令，那么具有最大匹配字符数的命令将被选择。如果不止一个命令有相同的匹配短语，那么第一个出现在菜单中的命令将被选择。

例如下面的每一个都匹配命令 set-ambient-color：set-ambient-color, s-a-c, sac, 和 sa。当缩写命令时，通常你的缩写会匹配不止一条的命令。在这种情况下，第一个命令将会被选择。有时候会有不正常的情况，比如说 lint 并不匹配 lighting-interpolation，因为 li 匹配 lights-on 但是 nt 并不匹配 interpolation。这一问题可以通过选择不同的缩写来解决，如 liin 或者 l-int。

Scheme Evaluation

如果你在菜单提示行中输入“(”，那么所有的插入语和所有的字符串加上“)”都会传送到被估值的 Scheme 中，而且估计的表达式显示如下：

```
> (define a 1)
a
> (+ a 2 3 4)
10
```

别名

在菜单系统中可以定义命令的别名。就 UNIX csh 外壳来说别名比命令执行的优先级要高。下面的别名是在 Cortex 中预定义的：error， pwd， chdir， ls 以及 alias。

Error：显示最近 Scheme 错误中断中无效 Scheme 对象

Pwd：打印工作目录，在这个工作目录中所有的文件操作都可以进行

Chdir： 改变工作目录

Ls：列出工作目录的文件

Alias：显示当前别名的符号列表。

文本提示系统

命令需要各种变量：数，文件名，yes/no 响应，字符串和列表。这些输入的统一界面是

一个文本提示系统，提示包括提示字符串以及相应的用方括号括起来的选项或者用方括号括起来的默认值。

filled grids? [no]

shrink-factor [0.1]

line-weight [1]

title [""]

获取提示的默认值只需要键入回车或者逗号

注意：逗号不是一个分隔符，它是默认值的分隔标志："1,2"表示 3 个值，“1”是第一个提示值，第二个提示值为默认，“2”为第三个提示值。在任何提示中输入“a”会显示一个简短的帮助信息。要中断一个提示序列只需要按 Control-C 即可。

数

一般大多数的提示类型是数，即可是整数也可是实数，举例来说，有效的输入如：16, -2.4, .9e5, 和+1e-5。整数也可以是二进制，八进制和十六进制的格式。如：十进制数 31 可以输入为 31, #b11111, #o37, 或者#x1f。In Scheme, 整数是实数的子集，所以你不需要加上小数点表明哪一个数是实数，2 也是实数 2.0。如果你在整数提示符中键入实数，那么小数部分会被省掉，如 1.9 就变成 1 了

布尔运算符

有些提示需要 yes 或 no 的响应。Yes 或 y 表示同意，no 或者 n 表示不同意。yes/no 提示通常用于证实某些潜在的危险操作如：覆盖文件，不保存文件就退出，数据，网格等是否进行。 有一些提示符需要真正的布尔值（真或假），其输入分别为#t 和#f.

字符串

字符串的输入需要双引号括起，如： "red"。会址标题或者绘制图例就是字符串的一个例子，字符串可以包括任何的字符，包括空格和标点。

符号

符号的输入不需要加引号。区域名，表面名以及材料名就是符号的例子。符号必须以字母开始不能包括任何的空格或逗号。

文件名

文件名只是字符串的一种，为方便起见，文件名不需要加双引号括起来。如果有些例外——文件名中有空格，那么文件名必须加双引号括起来

这样“方便”结果使得文件名提示无响应值。例如：

> (define fn "valve.ps")

fn

> hc fn

会结束 fn,文件名的硬拷贝，而不是 valve.ps。因为文件名提示无响应值，fn 没有机会求"valve.ps"的值，对于大多数其他的提示也是一样。

列表

FLUENT 中有些函数需要目标的列表，如：数，字符串，布尔运算值等。Scheme 对象的列

表是一个简单的由空白列表“’()”结束的对象序列。.每次列表提示一个单元，最后一个是空列表。这一结束列表组成了提示列表的末尾，既可能是空也可能包含任何值。为方便起见，空列表中可以输入“()”也可以输入标准格式“'()”。通常地，列表提示默认保存先前声明的列表。要修改列表，覆盖所需单元并用空列表结束进程。例如：

element(1) [()] 1
element(2) [()] 10
element(3) [()] 100
element(4) [()]

相应的创建三个数 1, 10, 和 100 的列表

element(1) [1]
element(2) [10]
element(3) [100]
element(4) [()] 1000
element(5) [()]

增加第四个单元。然后

element(1) [1]
element(2) [10]
element(3) [100] ()

只有 1 和 10 在列表中。随后输入：

element(1) [1] ,,'(11 12 13)

创建一个五元素列表：1, 10, 11, 12,和 13。最后一个空列表移走所有的单元

element(1) [1] ()

赋值

所有的响应（除了文件名）在被使用之前都被 Scheme 解释程序赋值了。因此你可以输入任何一个有效的 Scheme 表达式来响应提示。例如输入一个单位矢量，某一分量为 1/3 (不使用你的计算器)。

/foo> set-xy
x-component [1.0] (/ 1 3)
y-component [0.0] (sqrt (/ 8 9))

或者你可以输入一个有效函数，计算单位矢量的另一个分量

> (define (unit-y x) (sqrt (- 1.0 (* x x))))
unit-y
/foo> set-xy
x-component [1.0] (/ 1 3)
y-component [0.0] (unit-y (/ 1 3))

默认值绑定

任何提示的默认值被限制为 Scheme 符号"_" (下划线)以便于默认值可以形成 Scheme 表达式的一部分。例如，如果你想将默认值减去，你可以输入：

shrink-factor [0.8] (/ _ 3)

中断

代码的执行可以用<Control-C>停止，这时，目前的操作停止在下一个可恢复的位置。

系统命令

如果在UNIX操作系统中运行FLUENT，你可以用字符! (bang)来执行系统命令。在UNIX基础的操作系统下你可以执行系统命令。以!开始的所有字符串一直到下一行开始都会在子外壳中执行。与这些系统命令有关的任何进一步的输入必须被输入到你启动程序的窗口中，而且任何的输出也是在这个窗口中。(注意：如果你远程启动 FLUENT，这些输入和输出必须是在你启动外壳（Cortex）的窗口中。

```
> !rm junk.*
> !vi script.rp
```

别名 ls 和 pwd 在工作目录中调用 UNIX ls 和 pwd 命令。别名 chdir 改变了程序目前的工作目录。

!ls 和!pwd 将会在外壳启动的目录中执行 UNIX 命令。屏幕输出会在启动 FLUENT 的窗口中，除非你使用远程启动，在远程启动中会在你启动外壳的的窗口中输出。(注意：!chdir 或者!cd 在子外壳中执行，所以它不会改变 FLUENT 或者 Cortex 的工作目录，因此它并不是很有用)。不带任何声明的输入 chdir 会将你移到控制台的父目录。

下面是控制台中输入系统命令的几个例子。输出会在启动 FLUENT 窗口中出现（或者远程启动程序，就会在 Cortex 窗口中出现）

输入的例子（在 FLUENT 控制台中）：

```
 > !pwd
 > !ls valve.*
```

例子的输出(FLUENT 或者 Cortex 启动的窗口中)：

```
 /home/cfd/run/valve
 valve1.cas     valve1.msh     valve2.cas     valve2.msh
```

从字符串进行文本菜单输入

通常说来，当为 FLUENT 写入 Scheme 扩展函数，在函数中能够包含菜单命令是很方便的。使用 ti-menu-load-string 就可以实现。例如，要打开图形窗口 1，使用：

```
(ti-menu-load-string "di ow 1")
```

一个 Scheme 循环会打开窗口 0 和窗口 1，并在窗口 0 种显示网格的前一次视图，窗口 1 的后一个视图由下面给出：

```
(for-each
 (lambda (window view)

    (ti-menu-load-string (format #f "di ow ~a gr view rv ~a"

window view)))
```

```
 '(0 1)
 '(front back))
```

menu-load-string 用使用格式函数的循环来创建字符串。这一简单的循环也可以根本就不用菜单命令来写入，但是你需要知道菜单命令执行的 Scheme 函数：

```
(for-each

 (lambda (window view)

    (cx-open-window window)

    (display-grid)

    (cx-restore-view view))

 '(0 1) '(front back))
```

在 FLUENT 中，字符输入也为创建别名提供了一种简单的方法。例如：要创建显示网格的别名，你可以键入：(alias 'dg (lambda () (ti-menu-load-string "/di gr")))

那么任何时候你在菜单层中的任何地方输入 dg，网格就会在被激活的窗口中显示。

命令! ti-menu-load-string 在顶层菜单中估计字符的声明。当你调用 ti-menu-loadstring 时它会忽略你所在的任何菜单。因此，命令：

(ti-menu-load-string "open-window 1 gr")   ; incorrect usage

即使你在 display/下键入它也不会工作。字符必须输入 display/菜单才可能生效，如：

(ti-menu-load-string "display open-window 1 grid")

使用在线帮助

FLUENT 中有一个在线帮助工具，它提供了进入程序文档的简便方法。通过图形用户界面，你有完全的用户向导和参考向导，只需用鼠标键点击即可。用户向导和参考向导显示在 Help Viewer 面板中，它对于多重字体和图形轮廓起重要作用，对于浏览和交叉参考的按钮及超文本链接也起重要作用。

使用 GUI 帮助系统

有很多进入在线帮助的办法。对于特定条目和面板来说，你可以在面板或者上下文帮助中获取参考信息。你也可以跳到参考向导，或者将用户向导打开到当前页面，并使用超文本链接以及在线目录来查找你需要的信息。

注意：参考向导作为用户向导在线帮助的最后一章，包含了每一个菜单条目和面板的描述，还对文本界面命令的相关内容有简短描述。

Windows NT 用户请注意：这里所叙述的是应用于 UNIX 系统的在线帮助。有关于 FLUENT 在 Windows NT 系统上的在线帮助将是标准 Windows NT 帮助系统。要想获取有关使用 Windows NT 帮助的信息，在帮助下拉菜单中选择 How to Use Help 菜单条目。

面板帮助

要获得一个面板的帮助只需要在该面板中点击帮助按钮。Help Viewer 面板将会打开解释该面板中每一条目的功能的参考向导的相关章节。在这个章节中你还会发现到用户向导相

关章节的超文本链接，它讨论了如何使用面板并提供相关信息。

上下文（Context-Sensitive）帮助

如果你想知道如何或者什么时候使用某一菜单条目或面板，你可以使用上下文帮助功能。在帮助下拉菜单中选择 Context-Sensitive Help 条目 ：Help/Context-Sensitive Help。

使用问题标定指针，在下拉菜单中选定一个条目，或者点击图形用户界面的另一部分（比如说：一个面板）。Help Viewer 面板就会打开讨论该条目的用户向导的相关章节。

打开用户向导

要第一次打开用户界面或者重新打开最近查看的章节，在帮助下拉菜当中选择 User's Guide...菜单。Help/User's Guide...。当你第一次打开用户向导时，将会给出章节的列表。每一章节都是因个超文本链接以便于你查阅该章的内容。

打开参考向导

将 Help Viewer 面板打开到参考向导的第一页，这一页包含了每一面板和菜单条目的信息，它们以下拉菜单的方式排列，还包含了相关文本界面的描述（可以在用户向导中点击相关的超文本链接）。要在任何时候回到总面板，简单的点击 Help Viewer 面板底部的 Overview 按钮即可。

关于帮助的帮助

你可以获取关于在线帮助的的帮助信息，方法是在帮助下拉条目中选择 Using Help...菜单。Help/Using Help...。当你选择了该条目，Help Viewer 面板就会打开到 Using On-Line Help 部分。

文本界面命令的帮助 s

在 GUI 在线帮助中，执行比较功能的面板或者菜单条目中的部分描述了每一个文本界面命令。通过点击面板中的帮助按钮你可以知道哪一个文本命令符合特定的面板，然后在 Help Viewer 面板中移到下一页。文本命令也在用户向导最后的命令目录中列出。

文本命令的帮助也通过文本界面提供。详细内容请参阅文本用户界面帮助。

使用 Help Viewer 面板

你可以以几种不同的方法在 Help Viewer 面板中存取信息。在 Help Viewer 面板中(Figure 1)，你可以用鼠标点击所要查看的内容。

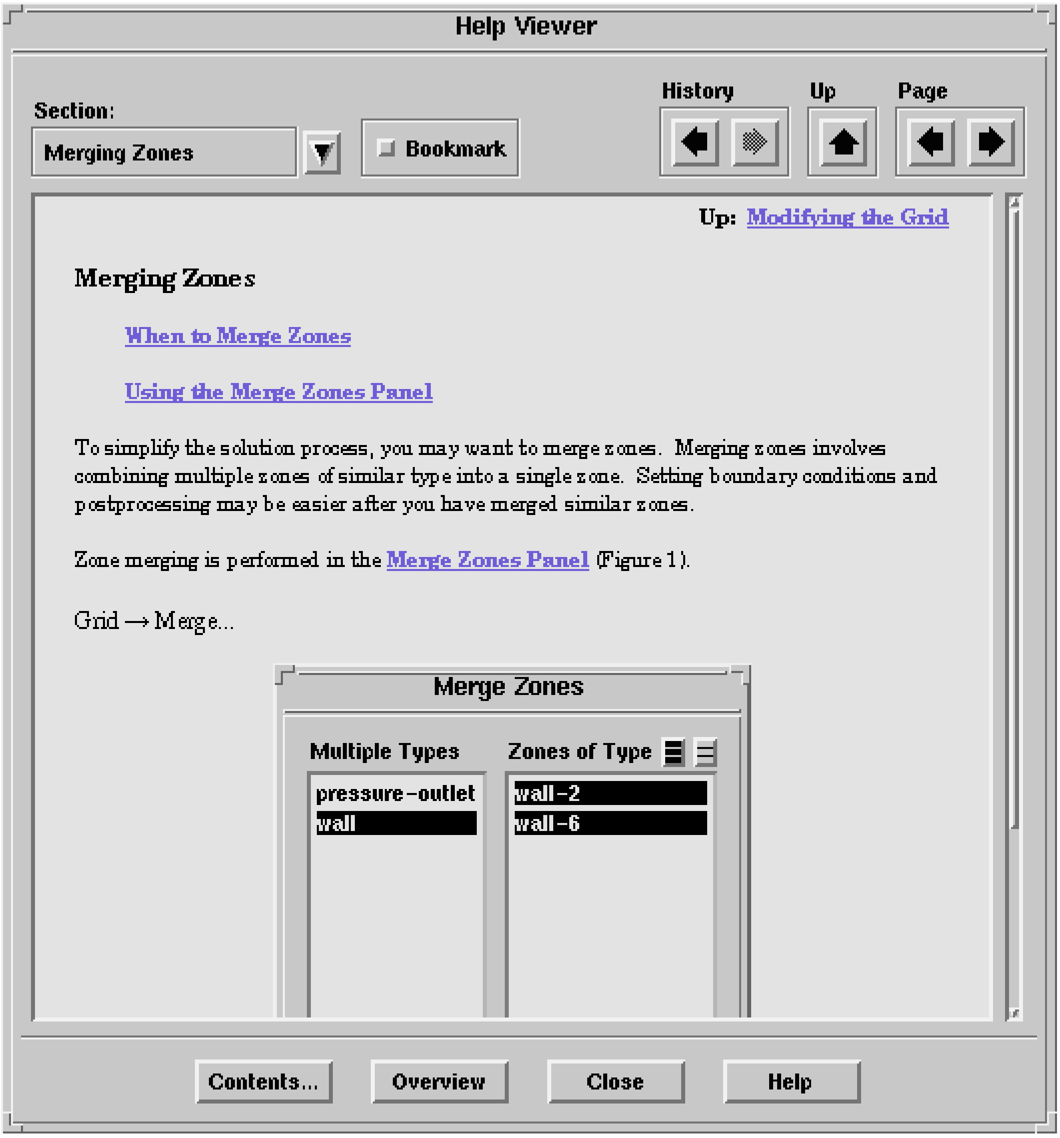


Figure 1:Help Viewer 面板

超文本链接可以使你很方便得跳到另一部分。这些内容就不详细介绍了，因为任何一个熟悉 Windows 的人都知道它的帮助怎么用，比如：向上一级，前进，后退，书签等。

使用帮助内容面板

帮助内容菜单显示了用户向导和参考向导的列表。它通常来源于 Help Viewer 面板或者和 Help Viewer 面板一起使用为我们提供了另一种浏览用户向导和参考向导的途径。要打开帮助内容面板，请在 Help Viewe 面板的底部点击 Contents…按钮。



Figure 1:帮助内容面板

第一次打开帮助面板它将只列出最高层（每章）的列表。要详细察看下一层的内容用鼠标点击所要查看的名字就可以了。后面有三个点的内容表示它还有下一层的分类。双击名字就可以查看相关内容，单击名字然后点击 View 按钮也可以查看相关内容。

版本与发布信息：点击 Help/Version 察看。

使用文本界面帮助

文本用户列表提供了上下文在线帮助。在文本菜单系统中，通过输入?加命令名，就会输出有关该命令的简短描述

例子：

> ?dis

display/: Enter the display menu.

你可以仅输入?进入帮助模式。在这个模式下你只需要输入命令或者菜单名就可以显示帮助信息了。输入 q 或者 quit 就可以退出帮助模式了。

例子：

> ?

[help-mode]> di

display/: Enter the display menu.

[help-mode]> pwd

```
pwd: #[alias]
(LAMBDA ()
     (cx-send '(system "pwd")))
  [help-mode]> q
```

你也可以在提示行输入?获取该提示行的帮助。

例子

```
display/annotate
Annotation text [""] ?
Enter the text to annotate the plot with.
Annotation text [""]
```

远程执行(只用于 UNIX 系统)

如果 FLUENT 已经启动但是没有版本声明(比如 3d)，你可以用选择解算器面板来确定解算器。File/Run...。

以这种方式启动解算器允许你在远程处理器上运行它。在默认情况下，当你键入命令启动 FLUENT 及相应版本，事实上是启动了 Cortex (它是一个为 FLUENT 提供用户界面和图形窗口的程序)，然后 Cortex 在其运行的相同处理器上启动 FLUENT。当你键入启动命令但不指定版本时，只启动了 Cortex。这一方法是你能够指定不同的运行解算器的版本。

远程机器运行的步骤

在远程处理器上运行 FLUENT 一般遵循如下步骤：

1. 在远程执行下，在选择解算器面板中设定远程机器的名字(Hostname)，以及拟在那个机器上的用户名(Username)和密码。
2. 在选择解算器面板中的版本和选项中指定适当的解算器版本（关于该选项的更多信息请参阅启动 FLUENT 和启动并行版本解算器的相关章节）。
3. 点击 Run 按钮。

如果远程机器拒绝启动解算器，你可能需要参阅下面所述的相关步骤。

在远程机器上手动启动解算器

上述第三步失败的话，你可以使用"listen"选项在阻止 Cortex 创建远程程序的网络安全驱动程序之外来启动 FLUENT。点击 Listen 按钮而不是 Run 按钮就告诉了 Cortex 等待手动启动 FLUENT 解算器。选择这个按钮之后，你将被提示输入声明-cx host:p1:p2 来启动解算器，其中的 host 是正在运行的 host Cortex 名字，p1:p2 是被冒号分隔的两个代表端口的整数。这样，解算器就会在另一个系统窗口中启动。输入

fluent version -cx host:p1:p2

version 为相关版本号，host 和端口号被显示在 FLUENT 文本窗口中。

通过读入 Case 文件进行远程执行

如果你打算通过读入 case 文件来启动适当的版本，但是你希望在远程机器上启动，你可以在第一步中指定远程机器，然后点击 Apply 按钮。这将会保存远程执行的设定。当你指定 Case 文件来启动解算器时，解算器就会在指定的远程机器上运行

批处理

FLUENT 可以以交互式人机界面运行，从屏幕中输入，并输出到屏幕。它也可以以批处理或者后台模式运行，此时输入从文件中获得，输出保存在文件中。一般说来，在问题设定、初始计算以及后处理时使用交互模式。当你打算大量的迭代时，你可能就希望 FLUENT 已批处理模式或者后台模式运行了。这使得计算机资源能够以重要性为顺序安排或处理，使你能够用文件控制（在计算过程中你就不必介入了），并将计算的历史记录（残数）输出到文件。FLUENT 以批处理模式运行依赖于你的操作系统，下面这节介绍了一下 UNIX 系统的后台处理。

UNIX 系统的后台处理

要在 UNIX 系统的 C-shell 中后台运行 FLUENT，请在系统层的提示行中键入下面的命令：

```
fluent -g < inputfile >&outputfile&
```

或者在 Bourne/Korn-shell 中，键入

```
fluent -g < inputfile > outputfile 2>&1&
```

在这些例子中

- 你键入的 fluent 是用来交互执行 FLUENT 的。
- -g 表示没有图形用户界面或者图形窗口。
- inputfile 是 FLUENT 命令文件，该文件记录了你在交互模式下需要输入的内容。
- outputfile 是后台工作创建的文件。它包括了 FLUENT 正常输出时，将要输出到屏幕的内容(如：菜单提示和残数报告)。
- &告诉 UNIX 系统在后台执行任务，并将所有的标准系统错误（如果有的话）输出到文件。

文件“inputfile”可以是先前 FLUENT 进程的日志文件，也可以是你用文本编辑器编辑的文件。在这两种情况下，文件必须仅由文本界面命令组成（因为在批处理过程中图形用户界面已经被禁用了）。下面是一个典型的输入文件：

```
rc example.cas
solve/init/init
it 50
wd example50.dat
it 50
wd example100.dat
exit
```

这一文件读入了一个 case 文件 example.cas，对解进行了初始化并在两组中共迭代了 100 步。最后一行结束了进程。注意：这一输入文件使用了读写 case 和 data 文件的标准别名来读写 case 和 data 文件与迭代（rc 是 file/read-case 的别名，wd 是 file/write-data 的别名）。这些预定义的别名允许你执行常用命令而不必输入对应的文本菜单。一般说来，FLUENT 假定输入开始于顶层文本菜单，所以如果你使用没有别名的文本命令，你必须保证键入命令的全部

名字(比如：solve/init/init).

下面是提交批处理命令的另一种方法，这一方法的优点在于，输出的文件包含了输入文件的命令记录。具体命令如下：
fluent -g -i inputfile >&outputfile&

退出程序：点击文件菜单中的 Exit 选项，如果还有未保存的东西，你会收到一个警告。这和一般的 Windows 程序是一样的。

第三章 读写文件

在使用 FLUENT 时你需要输入和输出几种类型的文件，其中读入的文件包括 grid, case, data, profile, Scheme,以及 journal 文件，还有包括包含 case, data, profile, journal,以及 transcript 的文件。 FLUENT 也可以保存面板的布局以及图形窗口的硬拷贝。使用各种可视化以及后处理工具可以输出数据。下面详细介绍一下上述内容。

FLUENT 读写的文件

表一列出了 FLUENT 所能读写的文件。关于各种文件的使用，哪一代码写哪一类型的文件，每一类型的文件的更多信息都可以参阅这个表。(注意：下表中的一些文件格式并不是 FLUENT 的格式，但是当它们被读入的时候格式会被自动转换)

表一：FLUENT 读写的文件

文件类型	创建文件的程序	使用该文件的程序
Grid	GAMBIT, TGrid GeoMesh, preBFC	FLUENT
Third-Party Grid	ANSYS, PATRAN, I-DEAS, NASTRAN, etc.	FLUENT
Case	FLUENT	FLUENT
Data	FLUENT	FLUENT
FLUENT/UNS Case	FLUENT/UNS 3 or 4	FLUENT
FLUENT/UNS Data	FLUENT/UNS 4	FLUENT
RAMPANT Case	RAMPANT 2, 3, or 4	FLUENT
RAMPANT Data	RAMPANT 4	FLUENT
FLUENT 4 Case	FLUENT 4	FLUENT
FIDAP 7 Neutral	FIDAP 7	FLUENT
Ray	FLUENT	FLUENT
PDF	prePDF	FLUENT
Journal	FLUENT	FLUENT
Transcript	FLUENT	user
Hardcopy	FLUENT	assorted
Plot	FLUENT	FLUENT
Profile	user, FLUENT	FLUENT
Data Export	FLUENT	Other codes
Scheme	user	FLUENT

读写文件的捷径

FLUENT 有几个功能使得读写文件很方便，它们分别为：自动添加和检测文件的后缀；二进制文件的读写；文件格式的自动检测（文本文件和二进制文件）；压缩文件的读写；Tilde expansion；文件自动编号；使文件覆盖确认的提示失效；默认文件后缀；二进制文件；检测文件格式

FLUENT 读写的各种类型文件都有默认的后缀(见表一中的 FLUENT 读写的文件)。对

于某些常用文件，解算器会自动添加或者检测适当的后缀，比如写一个 case 文件只需要写出文件名 myfile 之后，FLUENT 会自动添加文件名为 myfile.cas，对于 PDF 文件和 ray 文件也一样。

二进制文件

对于 case, data, 或者 ray 文件，FLUENT 会默认存为二进制文件。二进制文件比文本文件占有更少的空间，而且读写更快。但是需要注意的是，你无法阅读和编辑二进制文件，但可以阅读和编辑文本文件。如果你要保存文本文件，你只需要在写文件的时候在文件选择对话框中关掉二进制文件选项。

FLUENT 可以读入不同平台下的二进制文件，但是其它软件如 TGrid 不能。如果你需要在不同平台上将一个 case 文件读入 TGrid，你应该在 FLUENT 中保存为文本文件

检测文件格式

读入 case, data, grid, PDF, 或者 ray 文件，解算器会自动检测它是二进制文件还是文本文件

读写压缩文件

读压缩文件

在选择文件对话框中可以读入压缩文件。如果压缩文件扩展名是.Z，FLUENT 会自动激活 zcat 来读入文件数据，如果文件扩展名是.gz 解算器会自动激活 gunzip 来读入文件数据。比如：文件名为 flow.msh.gz，解算器会自动报告如下消息：Reading "| gunzip -c flow.msh.gz"...这表明读入的文件经过了一个操作系统的通道。

你也可以只键入文件名而不加任何后缀（比如：你不能确定文件是否为压缩文件）。首先，解算器尝试以所输入的名字打开文件，如果找不到那个名字的文件，它将尝试缺省的后缀和扩展名来搜索文件。比如：你键入了 file-name 为文件名，解算器将进行如下步骤直到找到一个文件：

- Name
- name.gz
- name.Z
- name.suffix
- name.suffix.gz
- name.suffix.Z

其中 suffix 是一个文件的常用扩展名，比如.cas 或者 msh，如果还是找不到文件，解算器将会返回一个错误报告。对于 Windows NT 系统，只有 gzip 压缩的文件可以读入(也就是文件的扩展名为.gz)。由 compress 压缩的文件在 Windows NT 系统是无法读入到 FLUENT 中的。注意：不要读压缩 ray 文件，FLUENT 无法正确读入。

写压缩文件

在选择文件对话框，可以通过加入扩展名 Z 或者 gz 写压缩文件。例如：你输入 flow.gz

作为 case 文件名，解算器会报告如下信息：Writing "| gzip -cfv > flow.cas.gz"...。状态信息表明 case 文件信息被 gzip 压缩，在这个特例中，cas 扩展名是自动加上的。Windows NT 系统的 FLUENT 文件只能被 gzip 压缩，如果是加.Z 扩展名就不会有文件的压缩了。不要写 ray 文件的压缩，FLUENT 将无法正确进入

Tilde Expansion (只用于 UNIX 系统)

在 UNIX 系统中，如果你指定"~/"作为文件名的头两个字符串，"~"会展开作为你的父目录。相似地，你也可以使用文件名~username/，~username 将会展开到"username"的父目录。如果你指定~/file 作为所要写入的 case 文件，FLUENT 会将文件 file.cas 保存在你的父目录中。你也可以指定一个父目录的分目录，如果你输入~/cases/file.cas，FLUENT 会在分目录中保存文件 file.cas。

文件的自动编号

在文件名中你可以包括几个特殊的字符串，这样你就可以在各种参数的基础上为文件快捷的计数。（这些参数包括：迭代步，时间步，或者迄今为止所保存文件的总数。）这样你就不必每次输入一个文件名了。

- 对于非定常流，你可以用反映时间步的名字来保存文件，相应的字符串为"%t"。例如：文件名 contours-%t.ps 会告诉解算器在适当的时刻保存文件，比如 contours-0001.ps 表示第一步保存的文件。
- 反映迭代步的符号为"%i"，例如：文件名 contours-%i.ps 表示在适当的迭代步中保存文件，contours-0010.ps 表示第十次迭代是保存的文件
- 要保存硬拷贝文件来反映硬拷贝文件在当前进程中迄今为止所保存的总数，使用的字符串为"%"。

下面的选项只用于硬拷贝文件

注意：使用上述方法保存文件时，FLUENT 系统不会提示你是否覆盖已经存在的同名文件。比方说，你重复使用文件名 myfile-%t.ps 来保存反映当前时间步的硬拷贝文件，如果你在第一个时间步中已经保存了文件 myfile-0001.ps，然后你又重新启动了计算并在第一个时间步中保存了另一个硬拷贝文件，解算器就会不检查先前的文件 myfile-0001.ps 而直接将它覆盖掉。

取消覆盖证实提示

作为默认设置，如果你要 FLUENT 写的文件名与原来已有的文件名相同，它会提示你是否覆盖原文件，如果你不想要解算器在覆盖文件时出现这个提示信息你可以选择 file/confirm-overwrite/text 命令，并回答 no。

网格文件的读入

网格文件是由 GAMBIT, TGrid, GeoMesh,和 preBFC 或者第三方 CAD 软件包生成的。从 Fluent 的角度来看，网格文件只是 case 文件的子集。网格文件包含所有节点的坐标系以及节点之间的连通性信息，连通性信息告诉我们节点如何与其它的面或单元连接和面的区域类型

和数量(比如 wall-1, pressure-inlet-5, symmetry-2)。网格文件不包括任何边界条件，流动参数或者解的参数。关于网格的详细信息请参阅网格操作一章

内部网格文件（文件已经保存为 FLUENT 格式）使用 File/Read/Case...菜单。GAMBIT, TGrid, GeoMesh,和 preBFC 能够写内部网格文件。读入这些文件的更多信息请参阅：GAMBIT 网格文件，GeoMesh 网格文件，TGrid 网格文件以及 preBFC 网格文件。

下面分别介绍：

读入 TGrid 网格文件
读入 GAMBIT 和 GeoMesh 网格文件
读入 preBFC 非结构网格文件
读入 preBFC 结构网格文件
读入 ANSYS 文件
读入 I-DEAS Universal 文件
读入 NASTRAN 文件
读入 PATRAN Neutral 文件
读入 an Unpartitioned Grid File Through the Partition Filter

读入新的网格文件

读入 TGrid 网格文件

TGrid 与 FLUENT 有相同的文件格式，所以可在 FLUENT 的 File/Read/Case...菜单中读入它的文件，TGrid 文件的详细信息请参阅 TGrid 网格文件一节。

读入 GAMBIT and GeoMesh Mesh 文件

如果你用 GAMBIT 或者 GeoMesh 创建 FLUENT 5, FLUENT/UNS,或者 RAMPANT 网格，你可以用 FLUENT 中的 File/Read/Case...菜单读入，点击 File/Read/Case...，选择 Case...菜单就激活了选择文件对话框，在对话框中指定要读入的文件名。

读入 preBFC 非结构网格

因为 preBFC 的非结构网格和 FLUENT 格式一样，读入菜单 File/Read/Case...。注意：必须使用 MESH-RAMPANT/TGRI 命令保存文件

读入 preBFC 结构网格，菜单：File/Import/preBFC Structured Mesh.。点击弹出选择文件对话框，选择文件之后便可以读入网格信息和区域类型

读入 ANSYS 文件，菜单 File/Import/ANSYS...，点击进入，方法同上。

读入 I-DEAS Universal 文件，菜单 File/Import/IDEAS Universal...点击进入，方法同上
读入 NASTRAN 文件，菜单 File/Import/NASTRAN...点击进入，方法同上
读入 PATRAN Neutral 文件，菜单 File/Import/PATRAN...点击进入，方法同上

通过划分转换器度入未划分的网格文件

要用 METIS 划分器来划分网格，然后将网格读入到 Fluent，请使用菜单：File/Import/Partition/Metis...。注意：这个菜单只能在并行 FLUENT 中使用。

读入新的网格文件

用特定网格设定完 case 文件之后，你可以将新网格与已知边界条件，材料属性，解参数等结合。这一功能一般用于产生比正在使用更好的网格，此时你不用重新输入所有的边界条件，材料属性和参数。只要新网格和原来的网格有相同的区域结构即可

新旧网格应该具有同一区域，并具有相同的顺序，否则会有警告出现，因为相容性可能会造成边界条件的问题。在文本界面使用 file/reread-grid 命令读入新网格

Case 和 Data 文件的读写

FLUENT 仿真的新信息保存在两个文件中：case 文件和 data 文件，下面将会介绍文件读写的命令以及设定时间间隔自动存储文件。

FLUENT 既可以读入文本文件也可以读入二进制文件，二进制文件的读写速度和存储速度要快一些。在选择文件对话框中点击写二进制文件按钮可以选择写二进制文件还是文本文件。除此之外你还可以用压缩格式读写文本文件和二进制文件。读文件的时候 FLUENT 会自动检测文件类型。

在进行网格适应的时候必须保存新的 case 文件和 data 文件，否则新的 data 据文件将和 case 文件不符。如果你不保存一个更新的 case 或 data 文件，FLUENT 会给出警告。

读写 Case 文件

Case 包括网格，边界条件，解的参数，用户界面和图形环境。有关 Case 文件的格式请参阅相关内容。读入 case 文件的命令也可用于读入内部格式的网格文件，因为网格信息是 case 信息的子集。也可以用菜单 File/Read/Case...读写 case 文件。

默认后缀

为了方便 case 文件名后缀为.cas。读写文件时 FLUENT 会自动加上相应后缀。

读写 data 文件

Data 文件包含每个网格单元的流动值以及收敛的历史纪录（残数值）。具体格式参阅相关内容。菜单 File/Read/Data..读入网格文件，菜单 File/Write/Data..写入网格文件

默认后缀

为了方便 data 默认后缀为.dat。在读写文件是 FLUENT 会自动添加后缀

Case 和 Data 文件一起读写

Case 文件和 data 文件包含了重新启动解的所有信息，Case 文件包含了网格、边界条件以及解的参数，Data 文件包含了流场的数值以及收敛的历史（残数值）。

点击菜单 File/Read/Case & Data..弹出对话框，选择具有相同文件名的.dat 和.cas 文件读入。

点击菜单 File/Write/Case & Data...方法同上。

自动保存 Case 文件和 Data 文件

在计算过程中一般是需要自动保存文件的，否则因为断电等故障可能造成计算前功尽弃。FLUENT 允许我们在计算时设定间隔保存文件。这一功能在时间相关计算时是非常有

用的，因为它使得我们不必中断计算来保存结果。对于定常问题也可以使用自动保存功能，从而可以检验迭代过程中不同状态的解

点击菜单 File/wite/utosave...，弹出下图：

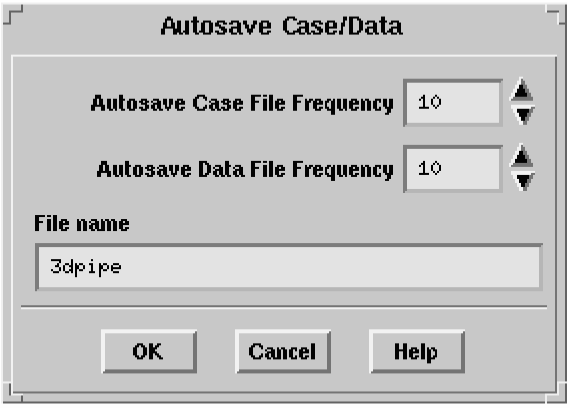


Figure 1:自动保存 Case/Data 面板

在这个面板中必须设定保存频率和文件名，保存频率的默认值是零，也就是说默认没有自动保存。

定常流是在迭代中指定保存频率，非定常流是在时间步中指定保存频率（若使用显式时间步进法也是在迭代中设定保存频率）。如果保存频率是 10，那么在定常计算中每迭代 10 步保存一次。FLUENT 自动保存不同的文件类型，用后缀来区分.cas、dat、gz 或者.Z。所有自动保存的设置都存在 case 文件中。

读入 FLUENT/UNS 和 RAMPANT 的 Case 文件和 Data 文件

FLUENT/UNS 3 或 4 以及 RAMPANT 2, 3,或 4 中创建的 case 文件可以和目前的 case 文件按相同的方式读入。如果读入的是 FLUENT/UNS 创建的 case 文件，FLUENT 将会在解控制面板种选择分离解。如果读入的是 RAMPANT 创建的 case 文件，FLUENT 将会在解控制面板种选择耦合显式解。

FLUENT/UNS 4 以及 RAMPANT4 中创建的 Data 文件可以按相同的方式读入到 FLUENT 中。

导入 FLUENT 4 的 Case 文件，点击菜单 File/Import/FLUENT 4 Case...出现对话框，选择所需文件。FLUENT 将只读入 FLUENT 4 case 文件的网格信息和区域类型，读入文件之后你必须指定边界条件，模型参数，材料属性等信息。

导入 FIDAP 7 Neutral 文件，点击菜单 File/Import/FIDAP7...，弹出对话框，选择所需文件。FLUENT 将只读入 FIDAP7...文件的网格信息和区域类型，读入文件之后你必须指定边界条件，模型参数，材料属性等信息。

创建和读入日志文件

日志文件包含了 FLUENT 命令序列，安排的方式就像它们将会输入到程序中或者通过图形用户界面输入一样。GUI 命令在日志文件中被记录为 Scheme 代码行。FLUENT 通过记录命令行中输入的所有内容和你输入到图形用户界面的所有内容创建日志文件。你也可以用

文本编辑器手动创建日志文件。

日志文件的目的通常是自动执行一系列的命令而不是在命令行重复输入它们。另一个用途就是对程序进程中的输入作一记录便于以后参考，虽然 transcript 文件在这一方面更有用。命令的输入源于指定的文件直到结束，结束之后控制回到标准输入（通常是键盘）。日志文件的每一行的读入和处理时都会响应到标准输出（通常是显示器）。

注意：在设计之初，日志文件只是为了记录和重放方便，所以它并不知道所记录和重放的状态。因此在读入日志文件之前你应该首先使解算器的状态恢复为原状态。比方说，如果你的日志文件包括了保存文件的命令，你就需要检查那个文件是否已经存在，如果不存在就没问题，存在的话它就应该提示你是否覆盖文件，但是因为日志文件中不存在提示信息，所以此时解算器就无法完成日志文件所要完成的任务。在程序中的操作和修改也可能会影响日志文件指令的执行。

例如：如果你的日志文件创建了几个表面并显示表面上的信息，那么在读入日志文件之前你首先要读入适当的 case 和 data 文件。

注意：在记录时一次只能打开一个日志文件，但是你可以同时写入日志文件和 transcript 文件。你也可以在任何时刻读入日志文件。

用户输入

要开始日志文件进程，请选择菜单：File/Write/Start Journal...
在文件选择对话框中输入文件名之后，日志记录就开始了，Start Journal...选项也变成了 Stop Journalmenu 选项。退出程序或者选择 Stop Journal 都可以结束日志文件的记录。（File/Write/Stop Journal）

你可以在点击菜单 File/Read/Journal..之后在选择文件对话框中读入日志文件。日志文件通常是在主文本菜单（最上层菜单）中加载，而不管你在哪一个文本菜单层。

创建 Transcript 文件

Transcript 文件包含了 FLUENT 标准输入输出的完全记录（通常是键盘和图形用户界面的输入和屏幕的输出）。在 transcript 文件中，GUI 命令是作为 Scheme 代码行来记录的。FLUENT 将所有的键入和图形用户界面的输入以及文本窗口的输出记录下来作为 transcript 文件。

Transcript 文件对程序的进程作了记录以便于将来的参考。因为它们包括消息以及其它输入，所以它并不像日志文件，它不可以重新读入到程序中。

注意：在记录时，只有一个 transcript 文件可以打开，但是你可以同时写日志文件和 transcript 文件。当 transcript 记录正在运行时，你也可以读入日志文件。

用户输入

要启动 transcripting 进程，请选择 File/Write/Start Transcript...菜单。在选择文件对话框中输入文件名之后，transcript 记录过程就开始了，而且 Start Transcript...按钮就会变成 Stop Transcriptmenu 按钮。点击 Stop Transcript 按钮或者退出程序就会结束 transcript 进程。

轮廓文件的读写

边界轮廓用于指定解域的边界区域的流动条件。例如，它们可以用于指定入口平面的速度场。

读入轮廓文件

点击菜单 File/Read/Profile...弹出选择文件对话框，你就可以读入边界轮廓文件了。

写入轮廓文件

你也可以在指定边界或者表面的条件上创建轮廓文件。例如：你可以在一个算例的出口条件中创建一个轮廓文件，然后在其它算例中读入该轮廓文件，并使用出口轮廓作为新算例的入口轮廓。

要写一个轮廓文件，你需要使用 Write Profile 面板(Figure 1)，菜单：File/Write/Profile...

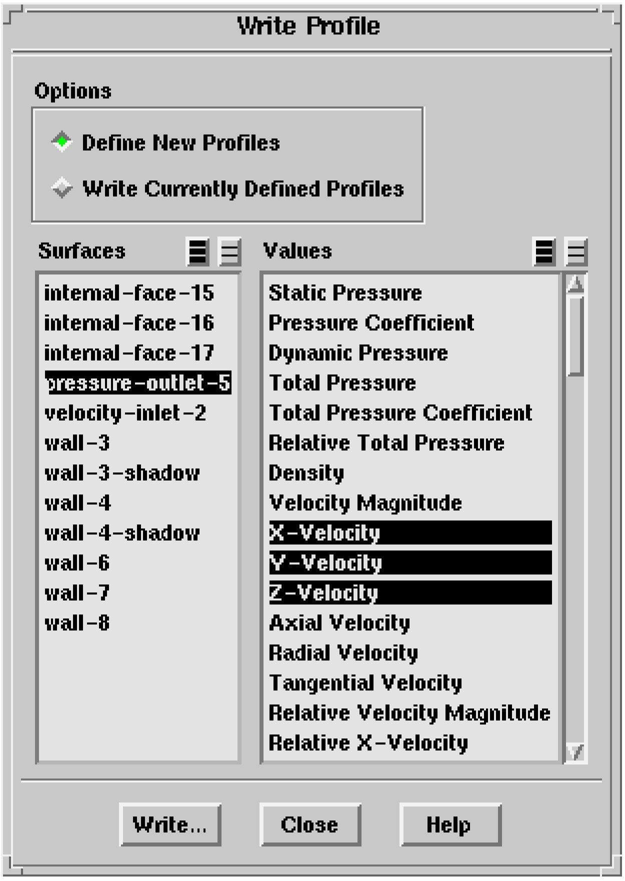


Figure 1:Write Profile 面板

1. 保留 Define New Profiles 的默认选项。
2. 选择表面，你想要在该表面上获取表面列表中的轮廓的数据
3. 选择变量，你想要在该值列表中创建轮廓
4. 点击 Write...按钮，并在选择文件对话框中输入轮廓文件的名字。

FLUENT 会保存表面上数据点的网格坐标，以及这些位置上所选定变量的值。当你将轮廓

文件读入到解算器中时，表面名将会是轮廓名，值的名字将是在边界条件控制面板的下拉菜单中出现的流场（field）名。

如果你在将轮廓读入时对边界轮廓进行了修改（比如：你将原轮廓再定位产生一个新的轮廓），或者你想将不同的轮廓文件用于一个 case 文件，你可以选择 Write Currently Defined Profiles 选项然后点击 Write...按钮。所有目前定义的轮廓都会保存在选择文件对话框中你所指定的文件中。不管你什么时候需要将该文件读入到解算器中，这个文件都可以读入

写边界条件网格

你可以将边界区域（表面网格）写进一个文件中。该文件可用 TGrid 读入来产生体网格。如果你对其它网格生成程序产生的网格不满意，你就会发现这项功能很有用。点击菜单 File/Write/Boundary Grid...打开选择文件对话框，你就可以将边界网格写入。

保存硬拷贝文件

图形窗口显示可以保存为各种格式，如：TIFF, PICT,和 PostScript。然而，在硬拷贝和所显示的图形窗口之间可能有略微的不同，这是因为硬拷贝是用内部软件着色生成的，而图形窗口可能是用特定的硬件进行性能优化的。许多系统提供了将图形窗口文件倒入（dump）到光栅文件的功能。这可能是生成硬拷贝最快的方法（因为整个图景已经在图形窗口中着色了），并且能够保证硬拷贝和窗口一样。

使用图形硬拷贝面板

要设定硬拷贝参数并保存硬拷贝文件，你就需要使用图形硬拷贝面板(Figure 1). 点击菜单：File/Hardcopy...。

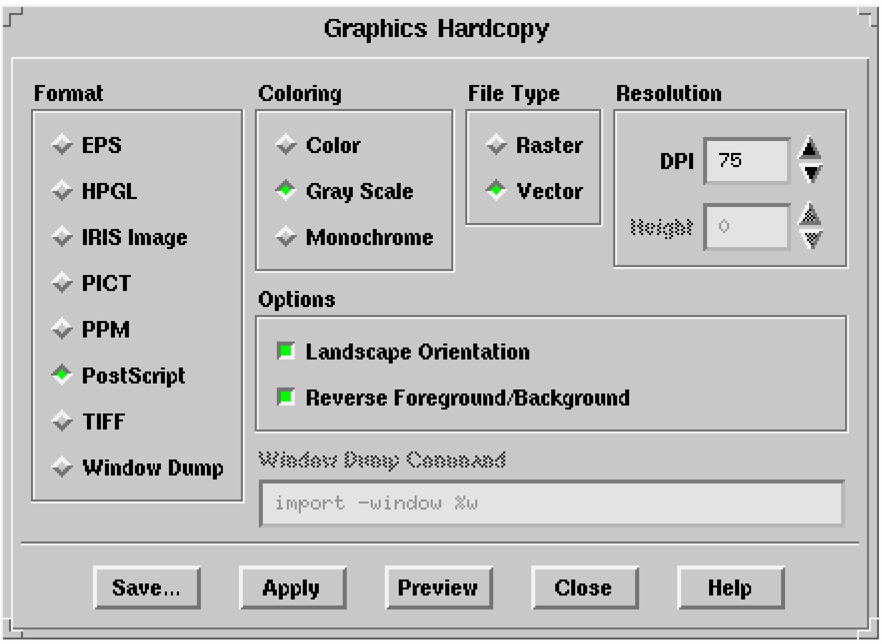


Figure 1:图形硬拷贝面板

下面是保存硬拷贝文件的程序，后面还会详细叙述

1. 选择硬拷贝格式
2. (可选)指定文件类型（如果可用）
3. 设定颜色
4. (可选)定义分辨率（如果可用）
5. 设定硬拷贝选项的中的任何选项
6. 如果你产生一个窗口的倾倒（dump），制定青岛命令
7. (可选)预览结果
8. 点击保存按钮，并在选择文件对话框中输入文件名

如果你想保存当前的硬拷贝设定，但是还不想保存当前的硬拷贝，你可以点击应用（Apply）按钮。应用的设定将会成为后来硬拷贝的默认设定。

选择硬拷贝文件的格式，在格式下拉列表中选择：

EPS (Encapsulated PostScript) 该输出和 PostScript 输出一样，只是附加了 Adobe 文档协议(v2)的声明。目前，在 EPS 输出中不包括位图的预览。通常说来，虽然实际的矢量 PostScript 信息是用来打印的，但是读入 EPS 文件的程序是用预览位图来显示在屏幕上的。你可以将 EPS 文件保存为光栅或者矢量格式。

HPGL 为 pen plotters 设计的矢量文件格式。HPGL 驱动器支持有限的颜色设定，对于有些场景无法正确着色。

IRIS Image 在 SGI 计算机上是自然的光栅格式图形文件，IRIS 图形驱动器并不是在哪个平台上都可以得到

PICT 在 Macintosh 计算机上是自然的图形文件。PICT 文件既可以包含光栅信息也可以包含矢量信息或者都包含。一般说来，"draw"程序产生矢量信息，"paint"程序使用光栅格式。你可以选择文件的保存格式。

PPM 输出为一般的光栅格式文件

PostScript 是一个一般的矢量文件格式，你也可以将 PostScript 文件保存为光栅格式

TIFF 是一个一般的光栅格式，TIFF 驱动器并不是在哪个平台上都可以得到

Window Dump (只用于 UNIX 系统)选择窗口倾倒操作产生硬拷贝。这种格式需要你指定适当的窗口倾倒命令。

选择文件类型

如果你保存 PostScript, EPS,或 PICT 文件，你可以选择光栅或者矢量文件类型。矢量图形定义图形显示为原始几何图形如：线、多边形和文本的组合。光栅文件定义图像中的每一个像素点的颜色。矢量图可以升级到任何分辨率，光栅图只有固定的分辨率。支持矢量图的有 PostScript, Encapsulated PostScript (EPS), HPGL, 以及 PICT。支持光栅图的有 IRIS 图像 , PICT, PostScript, Encapsulated PostScript,以及 TIFF。

一般说来，对于最快的输出时间，你应该将简单的二维图保存为矢量文件，复杂场景保存为光栅图。

指定颜色模式

对于除了窗口倾倒格式之外的所有格式，你都可以指定硬拷贝文件所要使用的颜色。对于彩色标度复制选择 Color，对于灰色标度复制选择 Gray Scale，对于黑白复制选择 Monochrome。注意：对于大多数单色 PostScript，会在灰的阴影处产生彩色图，但是不能够

保证彩色坡度随着灰度坡度线性增长，你应该选择 Gray Scale。

定义分辨率

对于光栅硬拷贝文件，你可以通过制定大小来控制硬拷贝图形的分辨率。在分辨率选项中选择宽度和高度，如果宽度和高度都是零，因拷贝文件的分辨率和图形窗口的分辨率一样。要检查图形窗口以像素点为单位的尺寸键入文本命令：display/set/rendering-options/device-info。注意：对于 PostScript, EPS, 和 PICT 文件，你需要指定每一英寸的点的分辨率而不是高度和宽度。

硬拷贝选项

对于除了窗口倾倒之外的所有硬拷贝格式，你可以在选项中控制两个附加的设定。首先你可以用 Landscape Orientation 按钮来指定硬拷贝的方向。如果这一项打开，硬拷贝就是在前景（landscape）模式中，否则是肖像（portrait）模式。其次你可以用 Reverse Foreground/Background 来控制前景和背景的颜色。如果这一项打开，硬拷贝图形窗口的前景和背景的颜色就会交换。这一功能可以用于黑白背景的硬拷贝操作。

FLUENT 提供了可以加速 PostScript 文件保存的选项。这一选项可以在文本菜单 display/set/hardcopy/driver/post-format 中找到。

fast-raster 允许一个比标准光栅文件大的光栅文件，但是输出更快

raster　输出标准光栅文件

rle-raster　允许一个 run-length 编码的光栅文件，它和标准光栅文件一样大，但是输出稍快。（这是默认的文件类型）。

vector　允许标准的矢量文件

窗口倾倒“Window Dumps”（只用于 UNIX 系统)

如果你选择窗口倾倒格式，程序会是用特定的窗口倾倒命令来保存硬拷贝文件。例如：如果你想用 xwd 来捕捉窗口，你选择的窗口倾倒命令为：

xwd -id %w >

在倾倒时，FLUENT 会自动解释“%w”为激活窗口的 ID 号。在选择文件对话框中点击保存按钮，输入文件名即可(比如：myfile.xwd)。

如果你打算做一个动画，你可以将窗口倾倒保存为几个标数的文件，变量为“%n”。然后你就可以使用上面所述的窗口倾倒命令，但是在选择文件对话框中你的文件名应该输入为：myfile%n.xwd

每次你创建了一个新的窗口倾倒，“%n”的值就会加一，所以不需要你手动添加。

如果你打算使用 ImageMagick 动画程序，将文件保存为 MIFF 格式效率会更高。这是你需要使用 ImageMagick 工具输入。对于窗口倾倒命令你需要输入：import -window %w（这是默认命令）。当你点击保存按钮之后，会弹出选择文件对话框，文件名后缀.miff 指定输出格式为 MIFF。

窗口倾倒命令是系统和图形驱动指定的，所以它强烈的依赖于你的详细配置

当保存的窗口倾倒时另一个需要考虑的问题是，窗口倾倒会在窗口显示时精确捕捉窗口，其中包括分辨率，颜色和透明度等。(正是这个原因使得你使用窗口倾倒格式时，在图形硬拷贝面板中的这些功能被取消了)。如果你使用 8 位图形显示，你可能需要使用一个内置的光

栅驱动器（如 TIFF）来产生高质量的 24 位颜色输出

预览硬拷贝图像

在你保存硬拷贝文件之前，你可能会选择预览所要保存的图形。点击预览按钮你就可以查看当前设定下的图形，如果不满意，可以在保存文件之前进行任何的修改，以提高硬拷贝的质量。

输出数据

当前版本的 FLUENT 允许你将数据输出到 AVS、Data Explorer、EnSight (以前叫做 MPGS)、FAST、FIELDVIEW、I-DEAS、NASTRAN、PATRAN 以及 Tecplot。使用输出面板一节解释了如何以这些格式保存数据，输出文件格式一节描述了每一类型的文件
注意：这些文件格式，只有 EnSight 和 FIELDVIEW 能用并行版本的 FLUENT 输出。

使用输出面板

要将数据写入到这些产品中来实现可视化和后处理，你需要使用 Export 面板(Figure 1). 点击菜单：File/Export...弹出下图：

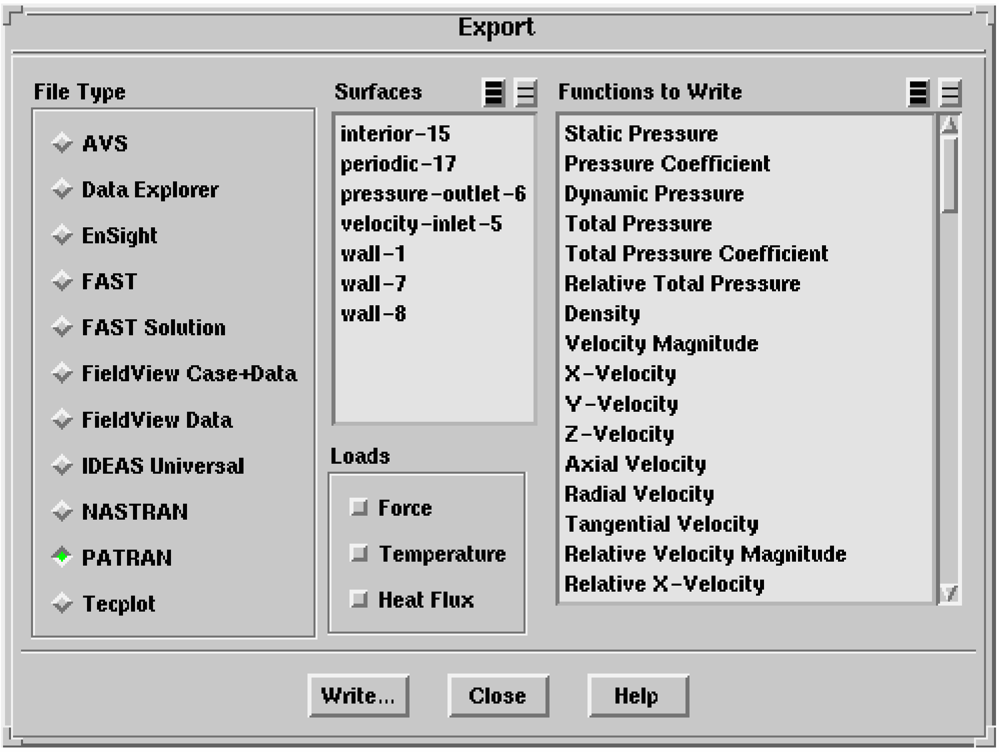


Figure 1:输出面板

步骤如下：

1. 在文件类型列表中选择文件类型。
2. 如果你选择 IDEAS Universal、NASTRAN 或者、PATRAN，在表面列表中选择你需要写入数据的表面。如果没有表面被选择，整个区域就会被输出。
3. 除了 FAST Solution 和 NASTRAN 所有文件类型，在 Functions to Write 列表中选择需要

保存数据的变量。

4. (可选)对于 IDEAS Universal、NASTRAN 和 PATRAN 文件，选择需要写入的负载(力，温度和/或热流量)，保存这些负载可以使你在有限元分析程序中分析结构应力（流体压力或者热）注意：当整个区域被输出时负载只被写入到边界壁面(即：如果你不选择表面)。
5. 点击 Write...按钮，使用选择文件对话框在指定的格式下为指定的函数保存文件。

输出文件的格式

下面是各种输出文件的类型：

AVS：　　AVS version 4 的 UCD 文件包括坐标和连通性信息以及指定标量函数的数据

Data Explorer：　　包含坐标、连通性、速度和指定函数数据

EnSight(以前是 MPGS)：图形文件包括坐标和连通性信息，速度文件包括速度，标量文件包括每个变量和函数的信息，结果文件列出了所有的文件名。

FAST：扩展 Plot3D 格式的网格文件包含了坐标和连通性信息，速度文件包含了速度信息，标量文件包括每个变量和函数的信息。这一文件类型只适合于三角形和四面体网格。

FAST Solution：一个文件包含了密度、速度和总能量，这一文件类型只适合于三角形和四面体网格。

FieldView Case+Data：FLUENT case 文件，可被 FIELDVIEW 读入，数据文件包含了所选变量的节点平均值。

FieldView Data：一个数据文件包含了所选变量的节点平均值。（对于瞬态流动模拟，你需要总是输出多重 FIELDVIEW 数据文件，但是通常只能保存一次 case 文件。在这种情况下，你可以使用 FieldView Case+Data 选项用 case 文件来保存第一个数据设定，然后用 FieldView Data 选项来保存后面的数据设定而不保存 case 文件）。

IDEAS Universal：一个文件，包含了坐标、连通性、选择的负载、区域组、速度和所选择的标量。

NASTRAN：一个文件，包含了坐标、连通性、选择的负载、区域组和速度。

PATRAN：一个文件，包含了坐标、连通性、选择的负载、区域组、速度和所选择的标量。

Tecplot：一个文件，以适当的格式保存了坐标和标量函数的信息。

读入 Scheme 源文件

Scheme 源文件有三种加载方式：通过作为菜单系统的 scheme 文件，通过作为菜单系统的日志文件，或者通过 Scheme 本身。

对于大的源文件，点击菜单 File/Read/Scheme..使用弹出选择文件对话框读入，或者 Scheme 加载函数：

```
> (load "file.scm")
```

短的文件也可以用菜单 File/Read/Journal..加载，或者在文本界面输入命令 file/read-journal（或者 source 别名）。

```
> . file.scm
> source file.scm
```

在这种情况下，文件的每一特征都响应到控制台，就像你用手键入文件内容一样。

Fluent 文件

在启动之初，FLUENT 会在你的父目录中查找一个叫做 fluent 的可选文件。如果找到了，它就用 Scheme 加载函数加载它。这一文件包含了定义代码的操作的 Scheme 函数。

保存面板布局

文件下拉菜单中的保存面板命令允许你保存当前面板和窗口的布局。你可以将面板和图形窗口以你喜欢的配置排列，然后调用保存布局命令。一个 cxlayout 文件就写到了你的父目录中了。（如果你后面又配置了不同的面板，并将布局又一次保存。这些面板的位置将会加到先前保存的面板的位置。如果你将一个已保存的面板移位，然后保存布局，那么一个新的位置将会写进 cxlayout 文件。）在随后的进程中，当你调用一个面板，或者创建新的图形窗口，它将基于原来保存的设置来定位。任何在已存设置中未指定的窗口或面板将采用默认位置。注意：父目录中的 cxlayout 文件适用于所有 Cortex 应用程序（即：TGrid, FLUENT, FLUENT/UNS, RAMPANT, NEKTON, 以及 MixSim）。

Case 文件和 Data 文件的格式

本节描述了 FLUENT Case 文件和 Data 文件的格式。根据下面的原则，我们将这些文件分为几个部分。

- 每一部分都用圆括号括起来，并以十进制整数开头来表明它的类型。
- 所有组的条目都用圆括号括起来。这使得跳到每部分末尾或者分析它们都很容易。它也考虑到以后的版本增加新条目的简单性和相容性。
- 条目列表的开头信息用前述条目的独立的各组括号括起来，并且每一条目被它们自己的括号括起来。

根据功能的不同，每一部分的介绍分组如下。如果你只是为解算器创建网格，你只需要考虑网格部分所描述的内容。如果你尝试将结果读入到其它的后处理器中，你就需要研究一下 Grid 部分和 Data 部分。其它(无网格)Case 部分，存储了边界条件，材料属性以及解算器控制的设定。

网格部分

网格部分存在 case 文件中。（网格文件是 case 文件的子集，仅包含了与网格有关的部分）。下面是目前所定义的网格部分。

下面所表明的每一部分的 ID 数既有符号形式也有数值形式。符号形式的描述，可以在 Scheme 源文件(xfile.scm)中作为符号而得到，也可以作为 C 头文件(xfile.h)的宏。这两种方法都可以从 Fluent Inc 得到。

注释

Index: 0
Scheme symbol: xf-comment
C macro: XF_COMMENT
Codes: FLUENT, TGrid
Status: optional

注释部分可以在网格部分中出现在文件的任何位置，具体用法如：
(0 "comment text")
强烈推荐每一个较长的部分，或每组相关的部分，都有注释部分开始来解释下面的部分，如：

```
(0 "Variables:")
(37 (
(relax-mass-flow 1)
(default-coefficient ())
(default-method 0)
))
```

标题（Header）

Index:	1
Scheme symbol:	xf-header
C macro: XF_HEADER
Codes:	FLUENT, TGrid
Status:	optional
标题部分可以在网格部分中出现在文件的任何位置，具体用法如：
(1 "TGrid 2.1.1")
这一部分的目的是确定写入文件的程序。虽然它可以出现在任何位置，但是一般说来它是文件的第一部分。附加的头文件部分表明产生文件时所使用的其它程序，因此表明了该文件的来源，和处理过程。

维度

Index:	2
Scheme symbol:	xf-dimension
C macro: XF_DIMENSION
Codes:	FLUENT, TGrid
Status:	optional
The dimensionality of the grid

```
(2 ND)
```

其中 ND 是 2 或 3，目前本部分用来检查有适当维数的网格。

节点

Index:	10
Scheme symbol:	xf-node
C macro: XF_NODE
Codes:	FLUENT, TGrid
Status:	required

```
(10 (zone-id first-index last-index type ND)(
x1 y1 z1
x2 y2 z2
```

.
.
.
))

如果区域 ID 是零，这是网格内节点总数的声明。第一个 index 将会是一，最后一个 index 将是以十六进制表示的节点总数，type 是无意义的，ND 是网格的维度，后面没有坐标。包围坐标的括号也没有。例如：

(10 (0 1 2d5 0 2))

如果区域 ID 大于零，它表明节点所属于区域。。第一个 index 和最后一个 index 是十六进制表示的节点的 index。当然，每一区域的最后一个 index 必须小于或等于声明部分的值。

Type 表明区域内节点的类型。TGrid 使用该值来表明下面的类型：零为虚拟节点，一为无类型或任何类型，二为边界节点。FLUENT 忽略零类型的节点，并将其它类型的节点全部读入，但是这些代码只写类型一。

ND 是可选的声明，它表明节点数据的维度。

如果网格维度是二，如维度部分所指定的，那么每一行只出现 x 和 y 的坐标。

下面是一个二维的例子

```
(10 (1 1 2d5 1 2)(
1.500000e-01 2.500000e-02
1.625000e-01 1.250000e-02
          .

          .
          .
1.750000e-01 0.000000e+00
2.000000e-01 2.500000e-02
1.875000e-01 1.250000e-02
))
```

因为网格连通性由整数描述指示器组成(见表面和单元一节)，在文件中使用十六进制保存空间，并提供了更快的文件输入输出。标题的 index 也用十六进制以便于它们和网格连通性部分的 index 匹配。为了保证相容性，区域 ID 和类型也是使用十六进制。

周期性 Shadow 表面

Index: 18

Scheme symbol: xf-periodic-face

C macro: XF_PERIODIC_FACE

Codes: FLUENT, TGrid

Status: required only for grids with periodic boundaries

本部分表明了周期性边界的成对周期性表面。周期性边界的网格都有这一类型的部分。下面是一个例子：

```
(18 (first-index last-index periodic-zone shadow-zone)(
f00 f01
```

f10 f21
f20 f21
.
.
.
))

其中 first-index 是列表中的第一个周期性表面对的 index，last-index 是最后一个，periodic-zone 是周期性表面区域的区域 ID，shadow-zone 相应的 shadow 表面的区域 ID，上面是它们的十六进制格式。

在 body (f*)部分的 index 是指每一周期性边界的表面（十六进制）以及偏移到网格的表面列表的 index。注意：first-index 和 last-index 并不是指表面 index，它们是指周期对列表的 index。

下面是该部分的一部分例子：

(18 (1 2b a c) (
12 1f
13 21
ad 1c2
.
.
.
))

单元

Index: 12
Scheme symbol: xf-cell
C macro: XF_CELL
Codes: FLUENT, TGrid
Status: required

单元的声明部分和节点的声明很类似：

(12 (zone-id first-index last-index type element-type))

区域 ID 为零表明了单元总数的声明。如果 last-index 为零，那么网格内没有单元。当文件只包含一个表面网格以告诉解算器该网格不可用时，这一功能很重要。当 element-type 被完全忽略时，这一类型在声明部分通常被忽略，并通常被设为零。例如：

(12 (0 1 3e3 0))

表明网格中有 3e3 (hexadecimal) = 995 个单元。这一声明是必需的，而且必须先于规则单元（regular cell）部分。规则单元部分标题内的 element-type 表明了该部分内的单元类型，如下：

element-type	description	nodes/cell	faces/cell
0	mixed		
1	triangular	3	3
2	tetrahedral	4	4
3	quadrilateral	4	4
4	hexahedral	8	6
5	pyramid	5	5

6	wedge	6	5

规则单元部分没有体，但是它们有一个具有相同格式的标题，其中first-index和last-index表明了特定区域的范围，type表明是流体区域单元(type=1)还是固体区域单元(type=0x11，或者十进制17)，或者悬挂节点母体（parent）(type = 0x20, or 32 decimal)，element-type表明区域内单元的类型。

类型为零表明无效区域，FLUENT会略过它。如果一个区域是混合类型(element-type=0)，它将有一个体列在每一单元元素类型中。例如：

```
(12 (9 1 3d 0 0)(
1 1 1 3 3 1 1 3 1
.
.
.
))
```

表明在区域9中，有3d (十六进制) = 61个单元，这一区域中前三个是三角形，下两个是四边形……。

当文件只包含表面网格时，TGrid不需要单元部分。

表面（Faces）

Index: 13
Scheme symbol: xf-face
C macro: XF_FACE
Codes: FLUENT, TGrid
Status: required

表面部分包含一个标题，和单元的格式相同（只是index为13）。

(13 (zone-id first-index last-index type element-type))

区域ID为零表明声明部分没有体，并且element-type表明了那个区域的表面类型。

规则表面部分的题包含了网格的连通性，每一行显示如下：

n0 n1 n2 cr cl

其中n*是表面节点或者顶点的定义，c*是邻近单元。这是一个三角形表面单元格式的例子，节点的准确数目依赖于element类型。单元index的顺序是很重要的，第一个单元cr是表面右边的单元，cl 是表面左边的单元,。旋向（Handedness）由右手定则确定：如果你根据节点的顺序弯曲右手，你的拇指将会指向表面的右边。如果没有临近单元cr或者cl是零。（所有的单元，表面和节点都具有正的index）。对于仅包含边界网格的文件，cr和cl都是零。，如果是二维网格n2被省略。

如果表面区域是混合类型(element-type = 0)，本部分的体会包含表面类型，如下：

type v0 v1 v2 c0 c1

其中type是表面类型，如下表所定义：

element-type	face type	nodes/face
0	mixed	
2	linear	2
3	triangular	3
4	quadrilateral	4

下面是当前有效的边界条件类型

bc name　bc id
interior　2
wall 3
pressure-inlet, inlet-vent, intake-fan　4
pressure-outlet, exhaust-fan, outlet-vent5
symmetry7
periodic-shadow　8
pressure-far-field　9
velocity-inlet　10
periodic　12
fan, porous-jump, radiator　14
mass-flow-inlet　20
interface　24
parent (hanging node)　31
outflow　36
axis　37

对于非一致网格界面，非一致网格交界处的表面被放进独立的表面区域。在交界处的类型加 1000，比方说：1003 就是一个壁面区域。

表面树（Face Tree）

Index:　59
Scheme symbol:　xf-face-tree
C macro: XF_FACE_TREE
Codes:　FLUENT
Status:　only for grids with hanging-node adaption

这一部分表明了包含悬挂节点的网格的表面层次。本部分的格式如下：

```
(59 (face-id0 face-id1 parent-zone-id child-zone-id)
(
 number-of-kids kid-id-0 kid-id-1 ... kid-id-n
 .
 .
 .
))
```

其中 face-id0 是本部分第一个父表面的 index，face-id1 是本部分最后一个父表面的 index，parent-zone-id 包含父表面的区域的 ID，child-zone-id 包含子表面的区域的 ID，number-of-kids 父表面的所有子表面的数量，kid-id-n 是子表面的 ID。这些是十六进制格式。

本节所包含的文件无法用 TGrid 读入

单元树（Cell Tree）

Index:　58
Scheme symbol:　xf-cell-tree
C macro: XF_CELL_TREE
Codes:　FLUENT
Status:　only for grids with hanging-node adaption
这一部分表明了包含悬挂节点的网格的单元层次。本部分的格式如下：

```
(58 (cell-id0 cell-id1 parent-zone-id child-zone-id)
(
 number-of-kids kid-id-0 kid-id-1 ... kid-id-n
 .))
```

其中 cell-id0 是本部分第一个父单元的 index，cell-id1 是本部分最后一个父单元的 index，parent-zone-id 包含父单元的区域的 ID，child-zone-id 包含子单元的区域的 ID，number-of-kids 父单元的所有子单元的数量，kid-id-n 是子单元的 ID。这些是十六进制格式。

本节所包含的文件无法用 TGrid 读入

界面表面的父子关系“Interface Face Parents”

Index:　61
Scheme symbol:　xf-face-parents
C macro: XF_FACE_PARENTS
Codes:　FLUENT
Status:　only for grids with nonconformal interfaces
本部分表明了交界表面和原始界面之间的关系。交界表面（子）产生于两个相互交界的非一致表面（父），它是原始表面的一部分。每一个“子”至少有一个“父”

本部分的格式如下：

```
(61 (face-id0 face-id1)
(
 parent-id-0 parent-id-1
))
```

其中 face-id0 是本部分第一个子表面的 index，face-id1 是本部分最后一个子表面的 index，parent-id-0 右边父表面的 index，parent-id-1 是左边父表面的 index。这些是十六进制格式。
如果你将非一致网格从解算起读入到 TGrid，TGrid 会略过这一部分，所以它不会包含任何保留非一致界面的信息。当你将网格重新读入的解算器时，你需要重新创建界面。
例子：

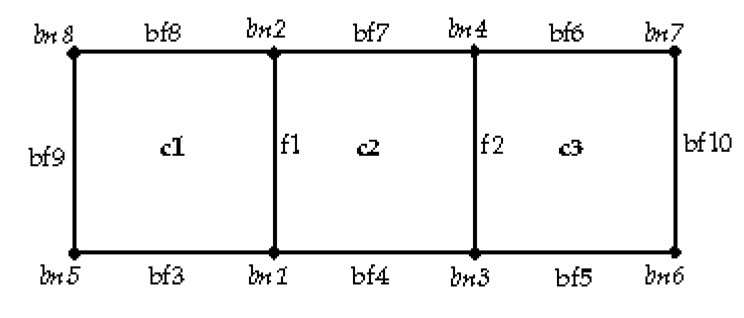


Figure 1 先是一个简单的不包含周期性和悬挂节点的四边形网格

下面是对该网格的描述

(0 "Grid:")

(0 "Dimensions:")
(2 2)

(12 (0 1 3 0))
(13 (0 1 a 0))
(10 (0 1 8 0 2))

(12 (7 1 3 1 3))

(13 (2 1 2 2 2)(
1 2 1 2
3 4 2 3))

(13 (3 3 5 3 2)(
5 1 1 0
1 3 2 0
3 6 3 0))

(13 (4 6 8 3 2)(
7 4 3 0
4 2 2 0
2 8 1 0))

(13 (5 9 9 a 2)(
8 5 1 0))

(13 (6 a a 24 2)(
6 7 3 0))

(10 (1 1 8 1 2)
(

1.00000000e+00   0.00000000e+00
1.00000000e+00   1.00000000e+00
2.00000000e+00   0.00000000e+00

2.00000000e+00   1.00000000e+00
0.00000000e+00   0.00000000e+00
3.00000000e+00   0.00000000e+00
3.00000000e+00   1.00000000e+00
0.00000000e+00   1.00000000e+00))

Figure 2 显示了具有周期性条件的简单的四边形网格，但是没有悬挂节点。在本例中，bf9 和 bf10 是周期性区域的表面。

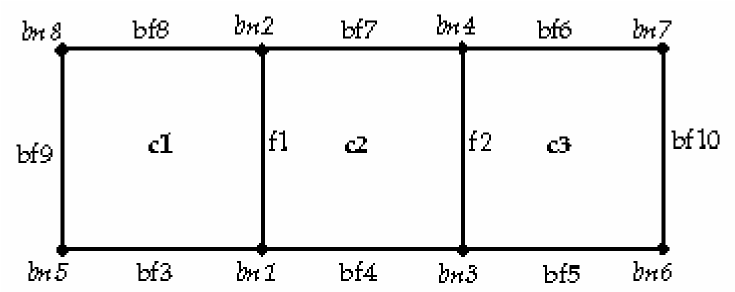


Figure 2: 具有周期性边界的四边形网格

下面是对该网格的描述：

(0 "Dimensions:")
(2 2)

(0 "Grid:")

(12 (0 1 3 0))
(13 (0 1 a 0))
(10 (0 1 8 0 2))

(12 (7 1 3 1 3))

(13 (2 1 2 2 2)(
1 2 1 2
3 4 2 3))

(13 (3 3 5 3 2)(
5 1 1 0
1 3 2 0
3 6 3 0))

(13 (4 6 8 3 2)(
7 4 3 0
4 2 2 0

2 8 1 0))

(13 (5 9 9 c 2)(
8 5 1 0))

(13 (1 a a 8 2)(
6 7 3 0))

(18 (1 1 5 1)(
 9 a))

(10 (1 1 8 1 2)(
 1.00000000e+00   0.00000000e+00
 1.00000000e+00   1.00000000e+00
 2.00000000e+00   0.00000000e+00

 2.00000000e+00   1.00000000e+00
 0.00000000e+00   0.00000000e+00
 3.00000000e+00   0.00000000e+00
 3.00000000e+00   1.00000000e+00
 0.00000000e+00   1.00000000e+00))

Figure 3 显示了具有悬挂节点的简单的四边形网格。

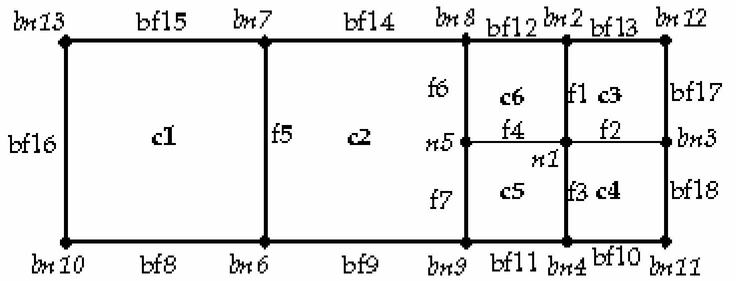


Figure 3: 具有悬挂节点的四边形网格

下面描述了这个网格
(0 "Grid:")

(0 "Dimensions:")
(2 2)

(12 (0 1 7 0))
(13 (0 1 16 0))
(10 (0 1 d 0 2))

(12 (7 1 6 1 3))
(12 (1 7 7 20 3))

(58 (7 7 1 7)(
4 6 5 4 3))

(13 (2 1 7 2 2)(
1 2 6 3
1 3 3 4
1 4 4 5
1 5 5 6
6 7 1 2
5 8 2 6
9 5 2 5))

(13 (3 8 b 3 2)(
a 6 1 0
6 9 2 0
4 b 4 0
9 4 5 0))

(13 (4 c f 3 2)(
2 8 6 0
c 2 3 0
8 7 2 0
7 d 1 0))

(13 (5 10 10 a 2)(
d a 1 0))

(13 (6 11 12 24 2)(
3 c 3 0
b 3 4 0))

(13 (b 13 13 1f 2)(
c 8 7 0))

(13 (a 14 14 1f 2)(
b c 7 0))

(13 (9 15 15 1f 2)(
9 b 7 0))

(13 (8 16 16 1f 2)(
9 8 2 7))

(59 (13 13 b 4)(

```
  2 d c))

(59 (14 14 a 6)(
  2 12 11))

(59 (15 15 9 3)(
  2 b a))

(59 (16 16 8 2)(
  2 7 6))

(10 (1 1 d 1 2)
(
  2.50000000e+00    5.00000000e-01
  2.50000000e+00    1.00000000e+00
  3.00000000e+00    5.00000000e-01
  2.50000000e+00    0.00000000e+00
  2.00000000e+00    5.00000000e-01
  1.00000000e+00    0.00000000e+00

  1.00000000e+00    1.00000000e+00
  2.00000000e+00    1.00000000e+00
  2.00000000e+00    0.00000000e+00
  0.00000000e+00    0.00000000e+00
  3.00000000e+00    0.00000000e+00
  3.00000000e+00    1.00000000e+00
  0.00000000e+00    1.00000000e+00))
```

其它（非网格）Case 部分

下面的部分保存了边界条件、材料属性和解算器控制的设定

区域

Index: 39

Scheme symbol: xf-rp-tv

C macro: XF_RP_TV

Codes: FLUENT

Status: optional

参考网格的每一个区域具有典型的一区域部分。虽然有些网格区域可能没有相应的区域部分，但是每一个区域不可以有多于一个的区域部分。

区域部分有如下格式

```
(39 (zone-id zone-type zone-name)(
  (condition1 . value1)
  (condition2 . value2)
```

(condition3 . value3)
.))

网格生成和其它的前处理器只需要提供标题并保留一列空的条件，如：

(39 (zone-id zone-type zone-name)())

最后的空括号是必需的。解算器会在适当的时候参照区域的类型加入条件。
在这里 zone-id 是十进制格式。这和网格部分的十六进制是有区别的。

区域类型是下面的一种：axis；exhaust fan；fan；fluid；inlet vent；intake fan；interface；interior；mass-flow-inlet；outlet vent；outflow；periodic；porous-jump；pressure-far-field；pressure-inlet；pressure-outlet；radiator；shadow；solid；symmetry；velocity-inlet；wall。
类型 interior, fan, porous-jump, 以及 radiator 只能被分配给流域内的表面区域。Interior 类型用于单元区域的表面，其它的类型用于组成流域内无限薄界面的表面。FLUENT 允许 wall 类型既可分配给在流域内部的表面区域也可分配给流域边界的表面区域。有些区域类型只对特定的网格部分的类型有效。例如：cell (element)区域只能分配给下面的类型：

fluid
solid

上面所列的其它类型只能用于边界（表面）区域。
区域名字是用户为区域指定的标志。它必须是有效的 Scheme 符号，而且在书写时不带引号。有效区域名字(Scheme symbol)的规则如下：

- 第一个字符必须是小写字母或者特定的初始字符
- 每一个后面的字符必须是小写字母，特定的初始字符，数字或者特定的跟随字符

其中特定的初始字符包括：! %&* / : < = > ? _ ^
特定的跟随字符包括： . + -
如：inlet-port/cold!, eggs/easy,和 e=m*c^2 都是有效的区域名字。
下面是网格生成器或者前处理器生成的区域部分的例子：

(39 (1 fluid fuel)())

(39 (8 pressure-inlet pressure-inlet-8)())

(39 (2 wall wing-skin)())

(39 (3 symmetry mid-plane)())

划分
Index: 40
Scheme symbol: xf-partition
C macro: XF_PARTITION
Codes: FLUENT
Status: only for partitioned grids
这一部分表明了每一单元的划分，格式如下：

(40 (zone-id first-index last-index partition-count)(

p1
p2
p3
.
pn
))

其中，p1 是 ID 为 first-index 的单元的划分，p2 是 ID 为 first-index+1 的单元的划分，pn 是 ID 为 lastt-index 也就是最后一个单元的划分。划分 ID 必须在 0 和 partition-count-1 之间，其中 partition-count 是总划分数。

数据部分

下面部分保存了迭代、残数以及数据场的值。

网格尺寸

Index: 33
Scheme symbol: xf-grid-size
C macro: XF_GRID_SIZE
Codes: FLUENT
Status: optional

这一部分表明了网格中的单元数、表面数和节点数，它们和文件中的数据相对应。这一信息用于检查数据和网格的匹配。格式为：

(33 (n-elements n-faces n-nodes))

其中整数是十进制的

数据场（Data Field）

Index: 300
Scheme symbol: xf-rf-seg-data
C macro: XF_RF_SEG_DATA
Codes: FLUENT
Status: required

本部分列出了单元或者表面区域的流场解变量的值。数据存储的顺序和 case 文件的表面或单元的顺序一样。变量存储的每一个表面或单元区域被分成独立的部分写出，格式为：

```
(300 (sub-section-id zone-id size n-time-levels
  n-phases first-id last-id)
( data for cell or face with id = first-id
  data-for-cell-or-face with id = first-id+1

  ..
  data-for-cell-or-face with id = last-id
```

))

其中，sub-section-id 是识别变量场的十进制整数（如：1 为压力，2 为速度）。这些的完全列表可以在 Fluent Inc 的标题文件(xfile.h)中获得。Zone-id 是单元或者表面区域的 ID 数，并与 case 文件中的 ID 匹配。Size 表示矢量变量的长度(1 为标量，2 或 3 为矢量，与为每一组分定义的变量数相等)。N-time-levels 和 n-phases 目前还没有使用。

下面是一个简单的数据文件部分的例子，它描述了定常、单相、二维问题单元区域的的速度场。

```
(300 (2 16 2 0 0 17 100)
(8.08462024e-01    8.11823010e-02
  8.78750622e-01    3.15509699e-02
  1.06139672e+00 -3.74040119e-02
  ...
  1.33301604e+00 -5.04243895e-02
  6.21703446e-01 -2.46118382e-02
  4.41687912e-01 -1.27046436e-01
  1.03528820e-01 -1.01711005e-01
))
```

数据文件中列出的变量依赖于文件写入时所用的模型。当数据文件读入时，依赖于当前模型设定的解算器所需要的变量如果从数据文件中丢失了，那么它们将会被设定为默认值。数据文件中所描述的任何额外的变量如果与当前模型无关，那么都会被忽略。

残数

Index: 301
Scheme symbol: xf-residuals
C macro: XF_RF_SEG_RESIDUAL
Codes: FLUENT
Status: optional

本部分列出了每一迭代步中特定数据场变量的残数值。

```
(301 (n residual-subsection-id size)(
r1
r2
.
.
.
rn
))
```

其中，n 残数的数目，size 变量矢量的长度(1 为标量，2 或 3 为矢量，与为每一组分定义的变量数相等) 。Residual-subsection-id 是十进制整数，根据头文件 xfile.h 定义的 C 常数，它表明了保存在该部分的残数的方程。这个头文件可以在 Fluent Inc 得到。

数据文件中列出的残数的方程依赖于文件写入时所用的模型。如果当前使用方程的残数的历史记录丢失了，它就会被初始化为零。

Fluent 单位系统

赵玉新（国防科技大学）

注意：本文只用于学习交流，如涉及版权问题请与作者联系

单位系统

本章介绍了 FLUENT 的单位系统及其控制方法。FLUENT 允许我们在任何单位系统下工作，即使是不相容的系统也可以。因此，举例来说，你既可以在英制单位下以瓦特作为热计算的单位又可以在长度定义上使用国际标准单位。FLUENT 解决该问题的办法就是在其他单位和国际标准单位之间设定转换因子，其实 FLUENT 解算器内部所使用的单位就只有国际标准单位，内部存储和计算全部是国际标准单位，只是输入和输出的时候中加了一个转换因子。

单位是可以在问题解决过程中转换的，转换的时间可以是在问题设定的时候也可以在完成计算的时候。如果以前输入一些国际单位的参数，后来转为输入其它单位，那么所有先前的输入和设定都会转换为新的单位系统。如果你的计算仿真是在国际单位下，而报告想在其它单位下做，你可以转换单位体统，FLUENT 会自动帮你将问题的所有数据转换为新的单位系统。需要强调的是 FLUENT 内部使用的是国际单位，所以单位的转换仅仅是将内部的数值转换到你所需的界面。

限制单位

需要注意 FLUENT 输入的单位和剩下问题单位的设定是不同的。必须在如下的定义中使用国际单位而不管你所使用的单位系统

- 边界特征
- 源项(参阅质量、动量、能量和其他源项的定义)
- 自定义流场函数
- 外部创建 XY 图形文件的数据
- 自定义函数

在定义材料属性时，所采用的是指定温度相关多项式或者分段多项式函数，请记住函数中的温度总是 Kelvin 或者 Rankine 单位。如果你使用的是 Celsius 或 Kelvin 作为你的温度单位，那么多项式的系数必须是 Kelvin；如果你使用 Fahrenheit 或者 Rankine 作为你的温度单位，你必须使用 Rankine 作为输入单位。关于温度相关的材料属性请参阅“用温度相关函数定义属性”一节。

网格文件的单位

一些网格文件允许我们对网格尺度定义一组单位。然而，当你将网格读入 FLUENT 的时候，它总是将长度单位假定为米，如果不是这样你就需要标度网格，具体内容请参阅“标度网格一节”

确定 FLUENT 中的单位系统

FLUENT 提供 British, SI, CGS, "default."单位系统。这些单位系统之间可以相互转换，转换方法是在设定单位面板中的 Set All To 选项中确定所要单位。菜单 Define/Units...

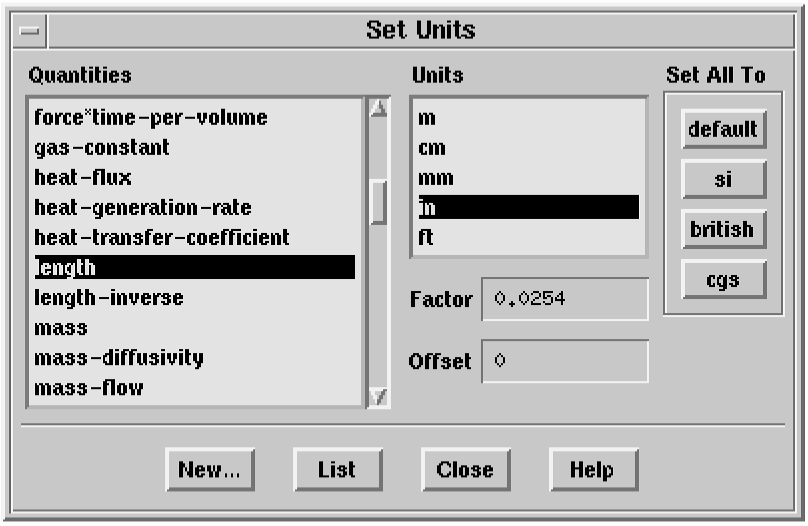


Figure 1:单位设定面板

英制单位点击 british 按钮；国际单位点击 si 按钮；CGS (centimeter-gram-second)单位点击 cgs 按钮；回到默认单位，点击 default 按钮。默认单位和国际单位相似，但角度单位是度而不是弧度。点击某一按钮之后单位系统马上就转换了，如果不想定义任何单位关闭面板就可以了。改变单位后，所有后来输入的单位都参照新的单位系统。

自定义单位系统

如果你想自己定义一个与上面所述四钟单位都不同的单位，你可以用单位设定面板选择可选单位或者指定自己的单位名称及相关转换因子。

列出当前单位

在定义一个或多个数量的单位之前，你可能想要列出当前单位，那么你只需要点击单位设定面板上的 List 按钮，FLUENT 就会在文本窗口中列出当前的所有量以及它们的单位、转换因子和偏移量。

改变某一量的单位

FLUENT 允许改变个别变量的单位。当你使用某一设定单位，但是想改变某一量或者少数几个量的单位时这一功能是很有用的。比方说你想要使用国际标准单位，但是图形的尺寸是英寸。你就可以选择国际标准单位然后将长度单位从米转换到英寸。具体转换步骤如下：

1.在数量列表中选定某一数量（它们是按照字母排序的）

2.选择新的单位

像上面的例子，你在数量列表中选择长度，然后选择所需单位。转换因子马上更新为 0.0254 meters/inch。如果新的单位有非零偏移量，偏移量也会随之更新。例如你使用国际单位作为温度的单位，但是现在用华氏温度取代开尔文温度，转换因子将会变成 1，偏移量将会变成 273.15。选定数量和新单位后，单位的改变就已经完成了，不需要再做其它的工作。

定义新的单位

对某一数量定义新的单位步骤如下：

1.在单位设定面板选定需要修改单位的量

2.点击 New...按钮，出现下图

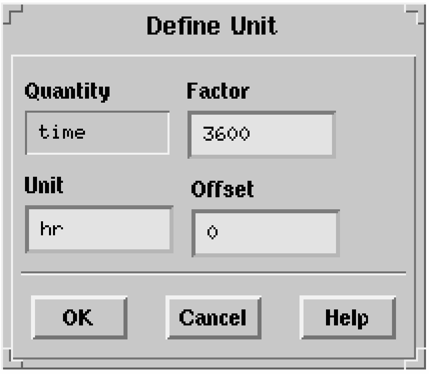


Figure 1:单位定义按钮

3.输入新单位的名字，转换因子以及偏移量

4.点击 OK 之后，新单位就出现在单位设定面板了

比如：你想要使用小时作为时间单位，你只需在数量列表中选择时间然后点击按钮，出现单位定义面板，输入转换因子 3600，点击 OK 即可。

在定义新单位时，转换因子都是相对国际单位的如果你想定义速度单位为 feet/min 你就可以按照下式计算转换因子：$x\frac{ft}{\min}\times\frac{0.3048m}{ft}\times\frac{\min}{60s}=y\frac{m}{s}$，至此你也就知道转换因子的含义了。

网格的读入和使用

FLUENT 可以从输入各种类型，各种来源的网格。你可以通过各种手段对网格进行修改，如：转换和调解节点坐标系，对并行处理划分单元，在计算区域内对单元重新排序以减少带宽以及合并和分割区域等。你也可以获取网格的诊断信息，其中包括内存的使用与简化，网格的拓扑结构，解域的信息。你可以在网格中确定节点、表面以及单元的个数，并决定计算区域内单元体积的最大值和最小值，而且检查每一单元内适当的节点数。以下详细叙述了 FLUENT 关于网格的各种功能。（请参阅网格适应一章以详细了解网格适应的具体内容。）

网格拓扑结构

FLUENT 是非结构解法器，它使用内部数据结构来为单元和表面网格点分配顺序，以保持临近网格的接触。因此它不需要 i，j，k 指数来确定临近单元的位置。解算器不会要求所有的网格结构和拓扑类型，这使我们能够灵活使用网格拓扑结构来适应特定的问题。二维问题，可以使用四边形网格和三角形网格，三维问题，可以使用六面体、四面体，金字塔形以及楔形单元，具体形状请看下面的图形。FLUENT 可以接受单块和多块网格，以及二维混合网格和三维混合网格。另外还接受 FLUENT 有悬挂节点的网格（即并不是所有单元都共有边和面的顶点），有关悬挂节点的详细信息请参阅“节点适应”一节。非一致边界的网格也可接受（即具有多重子区域的网格，在这个多重子区域内，内部子区域边界的网格节点并不是同一的）。详情请参阅非一致网格

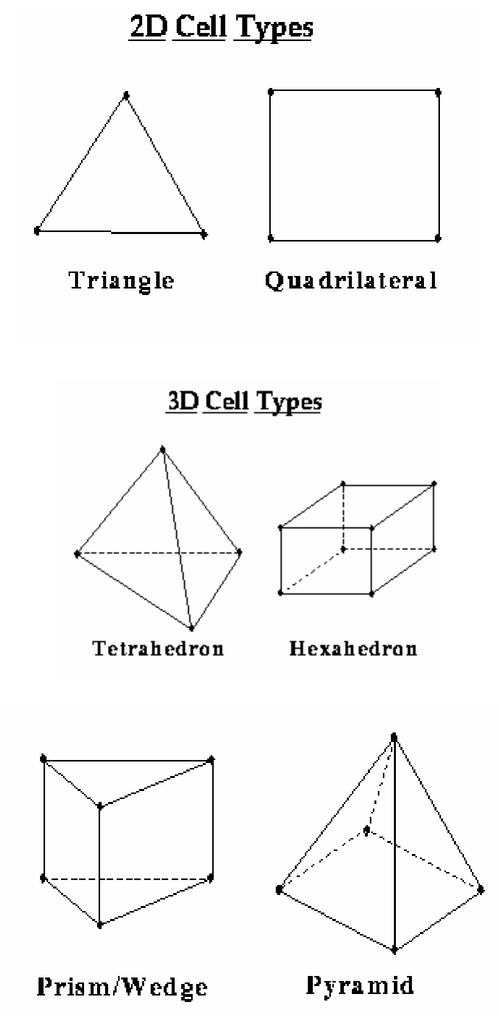


Figure 1: 单元类型

可接受网格拓扑结构的例子

正如网格拓扑结构一节所说，FLUENT 可以在很多种网格上解决问题。图 1—11 所示为 FLUENT 的有效网格。O 型网格，零厚度壁面网格，C 型网格，一致块结构网格，多块结构网格，非一致网格，非结构三角形，四边形和六边型网格都是有效的。Note that while FLUENT does not require a cyclic branch cut in an O-type grid， it will accept a grid that contains one.

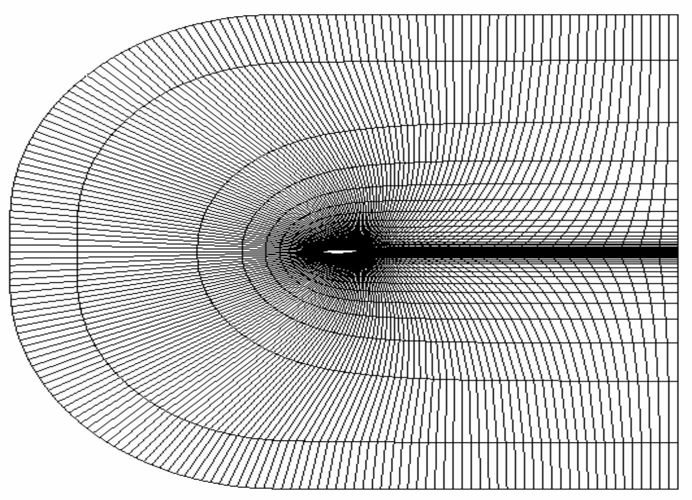


Figure 1: 机翼的四边形结构网格

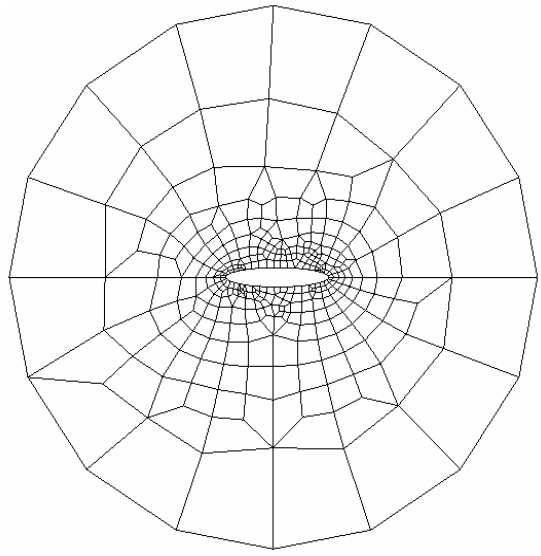


Figure 2:非结构四边形网格

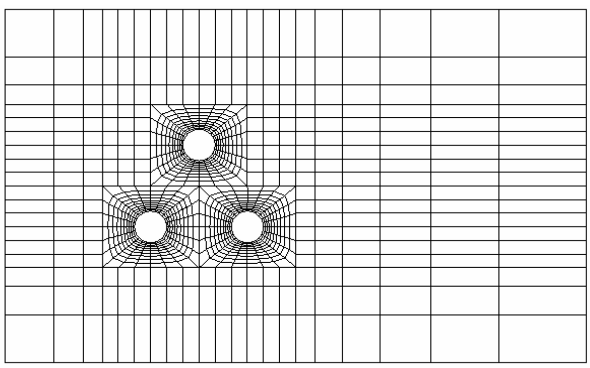


Figure 3: 多块结构四边形网格

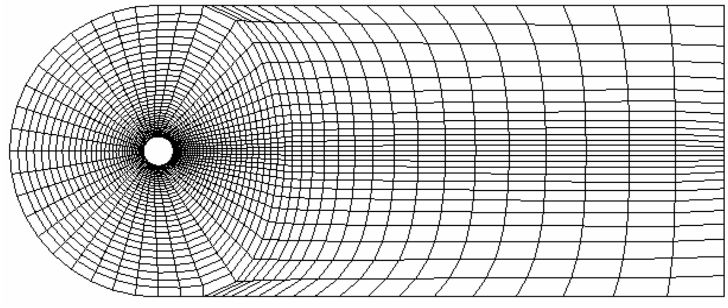


Figure 4: O 型结构四边形网格

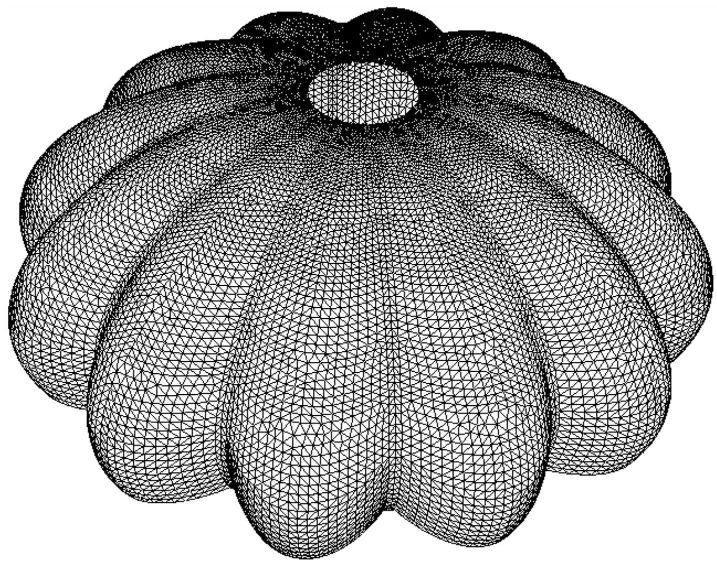


Figure 5: 降落伞的零厚度壁面模拟

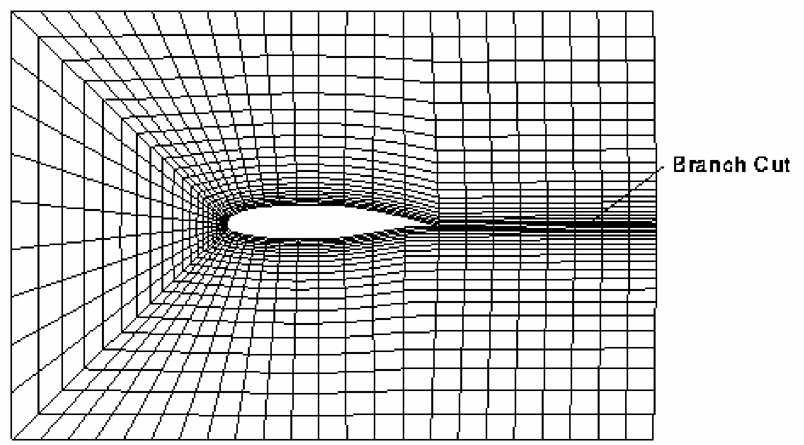


Figure 6: C 型结构四边形网格

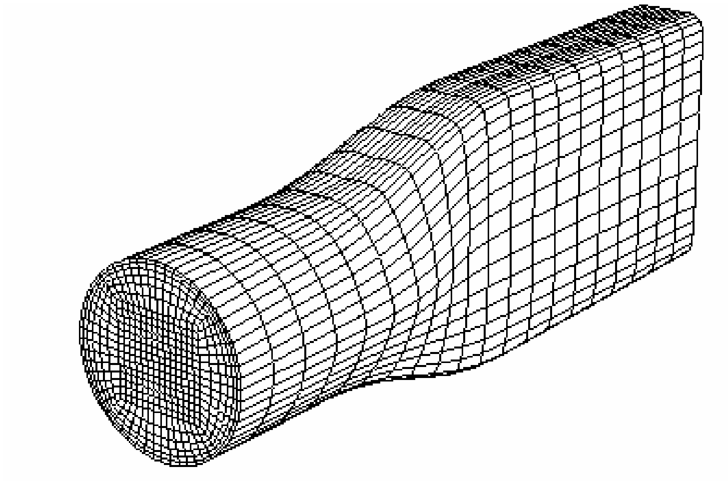


Figure 7:三维多块结构网格

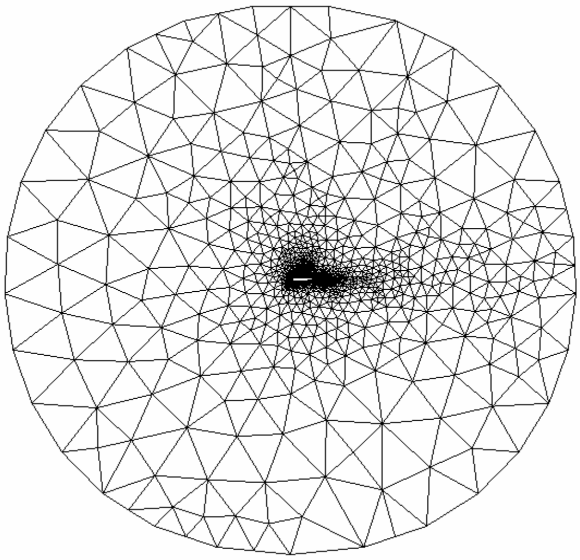


Figure 8: Unstructured Triangular Grid for an Airfoil

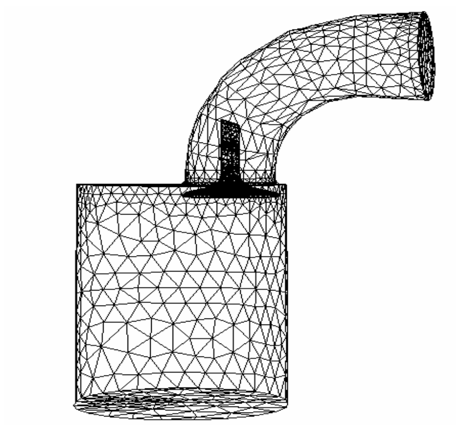


Figure 9:非结构四面体网格

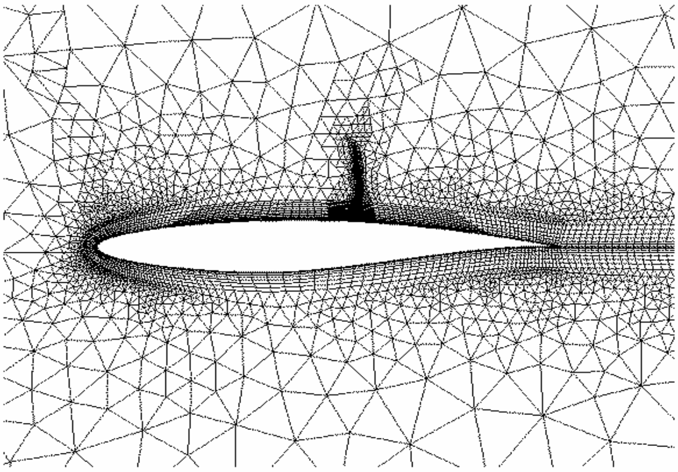


Figure 10:具有悬挂节点的混合型三角形/四边形网格

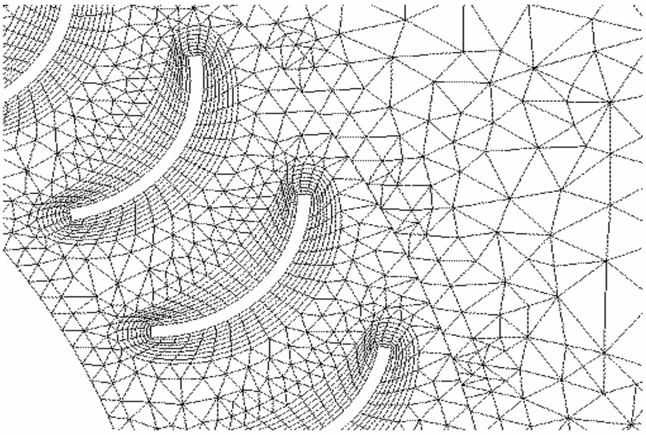


Figure 11:非一致混合网格 for a Rotor-Stator Geometry

选择适当的网格类型

FLUENT 在二维问题中可以使用由三角形、四边形或混合单元组成的网格，在三维问题中可以使用四面体，六面体，金字塔形以及楔形单元，或者两种单元的混合。网格的选择依赖于具体的问题，在选择网格的时候，你应该考虑下列问题：

- 初始化的时间
- 计算花费
- 数值耗散

后面将会详细讨论各种类型网格的特点。

初始化的时间

很多实际问题是具有复杂几何外形的，对于这些问题采用结构网格或块结构网格可能要花费大量的时间，甚至根本无法得到结构网格。复杂几何外形初始化时间的限制刺激了人们在非结构网格中使用三角形网格和四面体网格。然而，如果你的几何外形并不复杂的话，两种方法所耗费的时间没有明显差别

如果你已经有了结构网格代码如 FLUENT 4 生成的网格，那么在 FLUENT 中使用该网格会比重新生成网格节约大量的时间。这一特点也刺激了人们在 FLUENT 仿真中使用四边形网格和六面体网格。注意：FLUENT 有一个格式转换器允许你从其它程序中读入结构网格。

计算花费

当几何外形太复杂或者流动的长度尺度太大时，三角形网格和四面体网格所生成的单元会比等量的包含四边形网格和六面体网格的单元少得多。这是因为三角形网格和四面体网格允许单元聚集在流域的所选区域，而四边形网格和六面体网格会在不需要加密的地方产生单元。非结构的四边形网格和六面体网格为对于一般复杂外形提供了许多三角形和四面体网格的优点。

四边形和六边形单元的一个特点就是它们在某些情况下可以允许比三角形/四面体单元更大的比率。三角形/四面体单元的大比率总会影响单元的歪斜。因此，如果你有相对简单的几何外形，而且流动和几何外形很符合，比如长管，你就可以使用大比率的四边形和六边形单元。这种网格可能会比三角形/四面体网格少很多单元。

数值耗散

多维条件下主要的误差来源就是数值耗散又被称为虚假耗散（之所以被称为虚假的，是因为耗散并不是真实现象，而是它和真实耗散系数影响流动的方式很类似）。

关于数值耗散有如下几点：

- 当真实耗散很小时，即对流占主导地位时，数值耗散是显而易见的。
- 所有的解决流体问题的数值格式都会有数值耗散，这是因为数值耗散来源于截断误差，截断误差是描述流体流动的离散方程导致的。
- FLUENT 中所用的二阶离散格式可以帮助减少解的数值耗散的影响。
- 数值耗散量的大小与网格的分辨率成反比。因此解决数值耗散问题的一个方法就是精化网格。
- 当流动和网格成一条直线时数值耗散最小（所以我们才要使用结构网格来计算啊）

最后一点和网格选择最有关系。很明显，使用三角形/四面体网格流动永远不会和网格成一条直线，而如果几何外形不是很复杂时，四边形网格和六面体网格可能就会实现流动和网格成一条线。只有在简单的流动，如长管流动中，你才可以使用四边形和六面体网格来减少数值耗散，而且在这种情况下使用四边形和流面体网格有很多优点，因为与三角形/四面体网格相比你可以用更少的单元得到更好的解。

网格所需条件和所要考虑的问题

本节讨论了特殊几何图形和网格的必要条件以及网格质量的一般评价方法。.

几何图形和网格的必要条件

在计划解决你的问题的开始，应该注意下面的几何图形设定以及网格结构的必要条件。

- 对于轴对称图形来说，必须定义笛卡尔坐标系的 x 轴为旋转轴 (Figure 1).

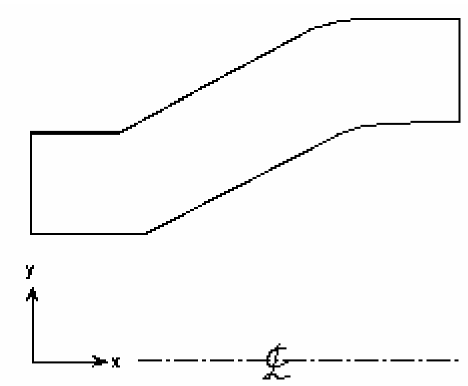


Figure 1:轴对称图形必须以 x 轴为中线

- 周期性边界条件要具有周期性网格，虽然 GAMBIT 和 TGrid 能够产生真正的周期性边界，但是 GeoMesh 和大多数 CAD 软件包是无法产生周期性边界条件的。如果下面的条件需要满足的话，TGrid 提供了 GeoMesh 和大多数 CAD 软件产生的三角形表面网格生成周期性边界的功能。
  1. 周期及其内部在它们的边界曲线上有相同的节点分布。
  2. 周期及其内部的节点与常数平动因子和转动因子有关。

  详情请见 GAMBIT 和 TGrid 的帮助文件。

如果你用 GeoMesh 和大多数 CAD 软件产生四边形网格和六面体网格，你必须保证在周期性区域内的网格是相同的。然后便可以在 FLUENT 中使用 make-periodic 命令建立周期性边界。详细内容请参阅“创建周期性区域”一节。(你能够在解算器中对三角形或四面体网格创建周期性边界条件而不用上面所述的 TGrid 来创建)

网格质量

网格质量对计算精度和稳定性有很大的影响。网格质量包括：节点分布，光滑性，以及歪斜的角度（skewness）。

节点密度和聚集度

连续性区域被离散化使得流动的特征解（剪切层，分离区域，激波，边界层和混合区域）与网格上节点的密度和分布直接相关。在很多情况下，关键区域的弱解反倒戏剧化的成了流动的主要特征。比如：由逆压梯度造成的分离流强烈的依靠边界层上游分离点的解。
边界层解（即网格近壁面间距）在计算壁面剪切应力和热传导系数的精度时有重要意义。这一结论在层流流动中尤其准确，网格接近壁面需要满足：

$$y_p\sqrt{\frac{u_\infty}{v_x}}\leq 1$$

其中

y_p=从临近单元中心到壁面的距离；u_∞=自由流速度 ；v=流体的动力学粘性系数 ；x =从边界层起始点开始沿壁面的距离。上面的方程基于零攻角层流流动的 Blasius 解[139]。

网格的分辨率对于湍流也十分重要。由于平均流动和湍流的强烈作用，湍流的数值计算

结果往往比层流更容易受到网格的影响。在近壁面区域，不同的近壁面模型需要不同的网格分辨率。

一般说来，无流动通道应该用少于 5 个单元来描述。大多数情况需要更多的单元来完全解决。大梯度区域如剪切层或者混合区域，网格必须被精细化以保证相邻单元的变量变化足够小。不幸的是要提前确定流动特征的位置是很困难的。而且在复杂三维流动中，网格是要受到 CPU 时间和计算机资源的限制的。在解运行时和后处理时，网格精度提高，CPU 和内存的需求量也会随之增加。自适应网格技术可用于在流场的发展基础上提高和/或减少网格密度，并因此而提供了网格使用更为经济的方法。

光滑性

临近单元体积的快速变化会导致大的截断误差。截断误差是指控制方程偏导数和离散估计之间的差值。FLUENT 可以改变单元体积或者网格体积梯度来精化网格从而提高网格的光滑性

单元的形状

单元的形状（包括单元的歪斜和比率）明显的影响了数值解的精度。单元的歪斜可以定义为该单元和具有同等体积的等边单元外形之间的差别。单元的歪斜太大会降低解的精度和稳定性。比方说：四边形网格最好的单元就是顶角为 90 度，三角形网格最好的单元就是顶角为 60 度。比率是表征单元拉伸的度量。正如在计算花费一节所讨论的，对于各向异性流动，过渡的比率可以用较少的单元产生较为精确的结果。但是一般说来应该尽量避免比率大于 5:1。

流动流场相关性

分辨率、光滑性、单元外形对于解的精度和稳定性的影响强烈的依赖于所模拟的流场。例如：在流动开始的区域可以忍受过渡歪斜的网格，但是在具有大流动梯度的区域这一特点可能会使得整个计算无功而返。因为大梯度区域是无法预先知道的，所以我们只能尽量的使整个流域具有高质量的网格。

网格的读入。

FLUENT 能够处理大量的具有不同结构的网格拓扑结构。因此我们有很多产生网格的工具，比如：GAMBIT，TGrid，GeoMesh，preBFC，ICEMCFD，I-DEAS，NASTRAN，PATRAN，ARIES，ANSYS，以及其它的前处理器，或者使用 FLUENT/UNS，RAMPANT，以及 FLUENT 4 case 文件中包含的网格，你也可以准备多个网格文件，然后把它们结合在一起创建一个网格。

GAMBIT 网格文件

你可以使用 GAMBIT 创建二维和三维结构/非结构/混合网格。详细内容请参阅 GAMBIT 建模向导，并将你的网格输出为 FLUENT 5 格式。所有的这样的网格都可以直接读入到 FLUENT，菜单：File/Read/Case...

GeoMesh 网格文件

你可以使用 GeoMesh 创建二维四边形网格或三角形网格以及三维六面体网格和三维四面体网格的三角网格面。具体请参阅 GeoMesh 用户向导。要完成三维四面体网格的创建你必须把表面网格读入到 TGrid 然后产生体网格。其它的网格都可以直接读入到 FLUENT：菜单 File/Read/Case...。

TGrid 网格文件

你可以用 TGrid 从边界或表面网格产生二维或三维非结构三角形/四面体网格。具体方法请参阅 TGrid 用户向导。在 FLUENT 中你可以点击 File/Write/Mesh...菜单保存网格。读入网格请点击 File/Read/Case...菜单，具体内容参阅读入网格文件一节。

preBFC 网格文件

你可以用 preBFC 产生两种 FLUENT 所使用的不同类型的网格：结构四边形/六面体网格和非结构三角形/四面体网格。下面详细介绍一下。

结构网格文件

要产生二维或者三维结构网格请参阅 preBFC 用户向导的第六章和第七章。产生的网格将包括四边形网格（二维）六面体网格（三维）单元。请记住要指定不多于 70 个壁面单元和不多于 35 个入口单元。读入网格请点击菜单：File/Import/preBFC Structured Mesh...。要手动将 preBFC 格式的网个文件转换到 FLUENT 格式，请输入以下命令：tfilter fl42seg inputflile outputfile。这样输出文件就可以点击菜单 File/Read/Case...读入到 FLUENT 中了

非结构三角形网格和四面体网格文件

产生二维非结构网格请参阅 preBFC 用户向导的第八章。并且你可以用 MESH-RAMPANT/TGRID 命令将网个文件保存为 RAMPANT 格式，因为目前的 FLUENT 格式和 RAMPANT 格式相同。所产生的网格会包含三角元。要读入网格点击菜单 File/Read/Case...。要产生三维非结构网格请参阅 preBFC 用户向导的第八章有关表面网格生成的内容。然后你可以将表面网格读入到 TGrid，在 TGRID 中完成网格的生成。更多信息请参阅 TGrid 网格文件一节。

ICEMCFD 网格文件

ICEMCFD 可以创建 FLUENT 4 的结构网格和 RAMPANT 格式的非结构网格。读入三角形和四面体 ICEMCFD 体网格，你需要光滑和交换网格以提高该网格的质量。

第三方 CAD 软件包产生的网格文件

FLUENT 可以使用 fe2ram 格式转换器从其它的 CAD 软件包读入网格，如：I-DEAS，NASTRAN， PATRAN， 以及 ANSYS。

I-DEAS Universal 文件

对于该种文件，我们有三种转换方法来使 FLUENT 读入 I-deas 文件。

1. 你可以使用一个包含三角形、四边形、四面体、楔形或者六面体单元的 I-DEAS 生成的表面或体网格文件。用适当的命令并且遵守 TGrid 用户向导附录 B 所属的规则可以将它们读入到 TGrid 中，然后在 TGrid 中完成网格的生成（必要的话）。
2. 你可以用线性的三角形，四边形，四面体，楔形或者六面体单元产生 I-DEAS 体网格。然后直接用菜单 File/Import/IDEAS Universal...将网格读入 FLUENT 中。
3. 你可以用线性的三角形，四边形，四面体，楔形或者六面体单元产生 I-DEAS 体网格，然后用格式转换器 fe2ram 将 Universal 文件转换为 FLUENT 格式。具体转换方法会在相关章节介绍，请参阅相关目录查找。转换之后的文件可以点击菜单 File/Read/Case...读入网格。

FLUENT 网格可以识别如下 Universal 文件的数据表：

节点坐标数据表数 15， 781， 2411。

单元数据表数 780 或者 2412

参数组数据表数 752， 2417， 2429

对于二维体网格，单元必须存在于坐标为常数的 z 平面。

注意：网格面积/体积不能被识别。这意味着将多重网格面积/体积写进一个 Universal 文件会使 FLUENT 弄混。

在 I-DEAS 节点是用 Group 组织来创建边界表面区域。在 FLUENT 中，边界条件被应用到每一个区域。在同一组中包含节点的表面被集合到单一区域。因此不要将内部节点和边

界节点放到同一组是很重要的。

在曲线上或网格面上自动生成组是一个技巧，这样，在 FLUENT 中每一个曲线或网格区域都将在不同区域。你也可以手动创建组，生成的组是由所有和给定的二维曲线或三维网格面相关的节点组成。

用 GROUPE 命令可以将 I-DEAS 中的元素组成一组来创建多重单元区域。在 FLUENT 中所有的元素组被组织到一起放到同一个单元中。如果元素未被组织，FLUENT 会将所有的单元放到同一区域。

创建网格时，I-DEAS 可能会在创建单元时产生两层或者重合节点。这些节点必须在读入 FLUENT 之前在 I-DEAS 中去掉

NASTRAN 文件

有三种方法将 NASTRAN 文件读入 FLUENT：

1. 你可以使用一个包含三角形、四边形、四面体、楔形或者六面体单元的 NASTRAN 生成的表面或体网格文件。用适当的命令并且遵守 TGrid 用户向导附录 B 所属的规则可以将它们读入到 TGrid 中，然后在 TGrid 中完成网格的生成（必要的话）。
2. 你可以用线性三角形，四边形，四面体，楔形或者六面体单元产生 NASTRAN 体网格。然后直接用菜单 File/Import/NASTRAN..将网格读入 FLUENT 中。
3. 你可以用线性的三角形，四边形，四面体，楔形或者六面体单元产生 NASTRAN 体网格，然后用格式转换器 fe2ram 将 NASTRAN 文件转换为 FLUENT 格式。具体转换方法会在相关章节介绍，请参阅相关目录查找。转换之后的文件可以点击菜单 File/Read/Case...读入网格。

用上述第二种或第三种方法读入三角形或四面体 NASTRAN 体网格时，你需要光滑和交换网格以提高该网格的质量。

FLUENT 可以识别下面的 NASTRAN 文件数据表：

GRID　单精度节点坐标

GRID*　双精度节点坐标

CBAR　线元

CTETRA，　CTRIA3　四面体和三角元

CHEXA，　CQUAD4，　CPENTA　六面体，四边形和楔形元

对于二维体网格，单元必须是在坐标为常数的 z 平面。创建网格时，可能会在创建单元时产生两层或者重合节点。这些节点必须在读入 FLUENT 之前在 NASTRAN 中去掉。

PATRAN Neutral 文件

该文件输入到 FLUENT 中有三种方法。

1. 你可以使用一个包含三角形、四边形、四面体、楔形或者六面体单元的 PATRAN 生成的表面或体网格文件。用适当的命令并且遵守 TGrid 用户向导附录 B 所属的规则可以将它们读入到 TGrid 中，然后在 TGrid 中完成网格的生成（必要的话）。
2. 你可以用线性三角形，四边形，四面体，楔形或者六面体单元产生 PATRAN 体网格。然后直接用菜单 File/Import/ PATRAN...将网格读入 FLUENT 中。
3. 你可以用线性的三角形，四边形，四面体，楔形或者六面体单元产生 PATRAN 体网格，然后用格式转换器 fe2ram 将 PATRAN 文件转换为 FLUENT 格式。具体转换方法会在相关章节介绍，请参阅相关目录查找。转换之后的文件可以点击菜单 File/Read/Case...读入网格。

用上述第二种或第三种方法读入三角形或四面体 PATRAN 体网格时，你需要光滑和交换网格以提高该网格的质量。

FLUENT 可以识别下面的 PATRAN 文件数据表：

节点数据　Packet Type 01

单元数据　　Packet Type 02
名字组成　　Packet Type 21

对于二维体网格，单元必须是在坐标为常数的 z 平面。在 PATRAN 中，单元是用 Named Component 命令组成一组来创建多重单元区域。在 FLUENT 中，所有组在一起的元素都被放在一个单元区域。如果元素没有被分组，FLUENT 会自动把所有的单元放进一个区域。

ANSYS Prep7 文件

该文件输入到 FLUENT 中有三种方法。

1. 你可以使用一个包含三角形、四边形、四面体、楔形或者六面体单元的 ANSYS 或 ARIES PATRAN 生成的表面或体网格文件。用适当的命令并且遵守 TGrid 用户向导附录 B 所属的规则可以将它们读入到 TGrid 中，然后在 TGrid 中完成网格的生成（必要的话）
2. 你可以用线性三角形，四边形，四面体，楔形或者六面体单元产生 PATRAN 体网格。然后直接用菜单 File/Import/ANSYS...将网格读入 FLUENT 中。
3. 你可以用线性的三角形，四边形，四面体，楔形或者六面体单元产生 ANSYS 体网格，然后用格式转换器 fe2ram 将 ANSYS Prep7 文件转换为 FLUENT 格式。具体转换方法会在相关章节介绍，请参阅相关目录查找。转换之后的文件可以点击菜单 File/Read/Case... 读入网格。

用上述第二种或第三种方法读入三角形或四面体 PATRAN 体网格时，你需要光滑和交换网格以提高该网格的质量。

FLUENT 可以识别下面的 Prep7 文件数据表：

N　　节点数据
EN　　带有单元标志的单元数据
NSEL　　节点选择
ESEL　　单元选择

单元必须是 STIF63 线性内核的单元。除此之外，如果单元数据没有明显的标志，转换器会在创建区域时假定单元的编号。

使用 fe2ram 转换器转换文件

如果你打算手动转换 CAD 文件然后再读入到 FLUENT，你可以输入下面的命令：
tfilter fe2ram [dimension] format [zoning] input-file output-file

其中方括号括起来的是可选内容（输入时不要加方括号）。维数表示数据表的维数。-d2 表示网格是二维的。如果不输入维数则默认为三维网格。格式表示你要转换文件的格式 -tANSYS 表示 ANSYS 文件，-tIDEAS 表示 I-DEAS 文件，-tNASTRAN 表示 NASTRAN 文件，-tPATRAN 表示 PATRAN 文件。要检查文件是否是从任何其它的 CAD 软件包转换来的请输入：tfilter fe2ram -cl –help。Zoning 表示 CAD 软件包有多少个区域被标识。-zID 表示区域被正确标识，-zNONE 表示忽略所有的区域组。对于被分组的网格区域，zoning 向不需要输入任何东西，因为这种情况是默认的。input-file 和 output-file 分别为需要转换的文件和转换后的文件名。

例如，你要将二维 I-DEAS 体网格文件 sample.unv 转换为 sample.grd 你就需要键入下面的命令：tfilter fe2ram -d2 -tIDEAS sample.unv sample.grd。

FLUENT/UNS 和 RAMPANT 的 Case 文件

FLUENT/UNS 3 或 4 的 case 文件或者 RAMPANT 2, 3,或 4 的 case 文件中的网格可以通过菜单 File/Read/Case...读入到 FLUENT

FLUENT 4 Case 文件

如果你有 FLUENT 4 Case 文件，而且想要在 FLUENT 仿真中使用相同的文件你可以点击菜单 File/Import/FLUENT 4 Case...，这样 FLUENT 4 case 文件的网格信息和区域类型就被读入了。

注意：FLUENT 4 可能会在预测压力边界条件方面与目前的 FLUENT 版本不同。这个时候需要检查转换信息看看是否需要修改边界类型。如果要手动转换，可以使用如下命令：tfilter fl42seg input-filename output-filename。转换之后你可以点击菜单 File/Read/Case...将文件读入到 FLUENT。

FIDAP 7 Neutral 文件

如果你有 FIDAP 7 Neutral 文件，而且想要在 FLUENT 仿真中使用相同的文件你可以点击菜单 File/Import/FIDAP7...，这样 FLUENT 4 case 文件的网格信息和区域类型就被读入了。如果要手动转换，可以使用如下命令：tfilter fe2ram [dimension] -tFIDAP7 input-file output-file，其中方括号内容是可以选择的-d2 表示二维文件，默认为三维。转换之后你可以点击菜单 File/Read/Case...将文件读入到 FLUENT。

读入多重网格文件

有些情况下你可能会需要从计算区域读入多重网格文件（子域）。下面就是一些例子。

- 如果你要解多块网格，你可以用网格生成器分别生成每块网格并分别保存
- 对于复杂形状来说，分块保存网格效率更高一些

注意：在分离网格交界处你不必保证网格节点在同一位置。FLUENT 可以处理非一致网格边界。读入多重网格的步骤如下：

1. 在网格生成器中生成整个区域的网格，将每个单元区域保存成一个网格文件
2. 如果你所要输入的一个或多个网格是结构网格，你首先要使用转换器 fl42seg 转换为 FLUENT 所能识别的格式。
3. 在启动解算器之前你要用 TGrid 或者 tmerge 转换器将网格合并成一个网格文件。TGrid 方法更为方便，但是 tmerge 转换器允许你在合并之前旋转，标定和/或平移网格。

使用网格的程序如下：

1. 将所有的网格文件读入 TGrid。读入之后 TGrid 会自动合并网格。
2. 保存合并后的网格文件

详细内容请参阅 Tgrid 用户向导相关内容。

使用 tmerge 转换器，请参阅下面的步骤：

1. 输入 tfilter tmerge3d (对三维网格)或者 tfilter tmerge2d (对二维网格).
2. 提示的时候，指定输入网格的文件名（分离网格文件）和保存为完整网格的输出文件名。对于每一个输入网格，你可以指定标度因子，平抑距离和/或旋转角度。下面的例子是既没有标度也没有平移和旋转的情况。

```
user@mymachine:>tfilter tmerge2d
Starting /Fluent.Inc/tfilter2.5/ultra/tmerge2d/tfilter.2.0.16
Append 2D grid files.
tmerge2D Fluent Inc, Version 2.0.16
Enter name of grid file (ENTER to continue):my1.msh
x,y scaling factor, eg. 1 1                    : 1 1
```

x,y translation, eg. 0 1 : 0 0
rotation angle (deg), eg. 45 : 0
Enter name of grid file (ENTER to continue):my2.msh
x,y scaling factor, eg. 1 1 : 1 1
x,y translation, eg. 0 1 : 0 0
rotation angle (deg), eg. 45 : 0
Enter name of grid file (ENTER to continue):<ENTER>
Enter name of output file :final.msh
Reading...
node zone: id 1, ib 1, ie 1677, typ 1
node zone: id 2, ib 1678, ie 2169, typ 2
done.
Writing...
492 nodes, id 1, ib 1678, ie 2169, type 2.
1677 nodes, id 2, ib 1, ie 1677, type 1.
done.
Appending done.

在上面例子中，既没有标度也没有平移和旋转，你就可以简化为下面的步骤：

tfilter tmerge2d -cl -p my1.msh my2.msh final.msh

3. 将合并后的网格读入到解算器中。

`对于一致网格，如果你不想要临近单元区域之间的边界，你可以使用 Fuse Face Zones 面板将重叠的边界合并。匹配面就会被移动到具有内部边界类型的区域。如果所有的表面所在的最初的区域被移到新的区域，最初的区域将会作废。

如果你计划是用滑动网格，或者在临近单元之间有非一致边界，你不应该合并重合的区域，你必须将重合区域的边界类型改为界面

非一致网格

在 FLUENT 中可能会遇到具有非一致边界的区域组成的网格。也就是说，两个字区域的交界处网格节点位置并不相同。FLUENT 处理这类网格的技巧和滑移网格模型的技巧相同，虽然这类网格并不滑移。

非一致网格计算

要计算非一致边界的流动，FLUENT 必须首先计算组成边界的界面区域的交叉点。交叉点产生了一个内部区域，在这个内部区域内，两个界面区域重叠(见 Figure 1)。如果一个界面区域超出了另一个界面区域(见 Figure 2)。FLUENT 将会在两个区域不重叠的地方创建一个或两个附加的壁面区域。

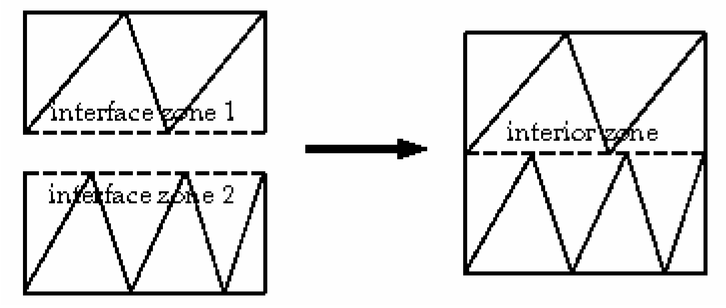


Figure 1:完全重合网格界面交叉点

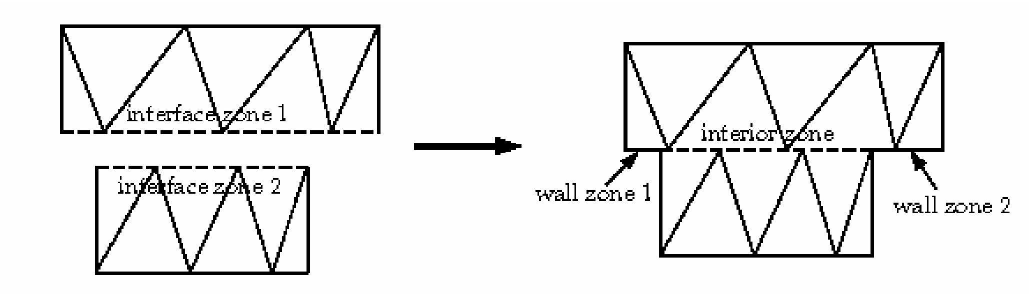


Figure 2: 部分重合网格界面交叉点

主要解决的方法在于，流过网格交接面的计算是使用两个界面区域交叉点的表面结果，而不是交界面区域表面。在 Figure 3 的例子中，界面区域由面 A-B、B-C、D-E 以 E-F 组成。这些区域的的交界面产生了面 a-d、d-b、b-e 以及 e-c。产生在两个单元区域的重叠处的面(d-b, b-e, 以及 e-c)被分组形成一个内部区域，剩下的面(a-d)形成壁面区域。要计算通过界面流入到单元 IV 的话，面 D-E 就被忽略了，而面 d-b 和 b-e 被使用，它们分别将信息从单元 I 和 III 带入到单元 IV 中。

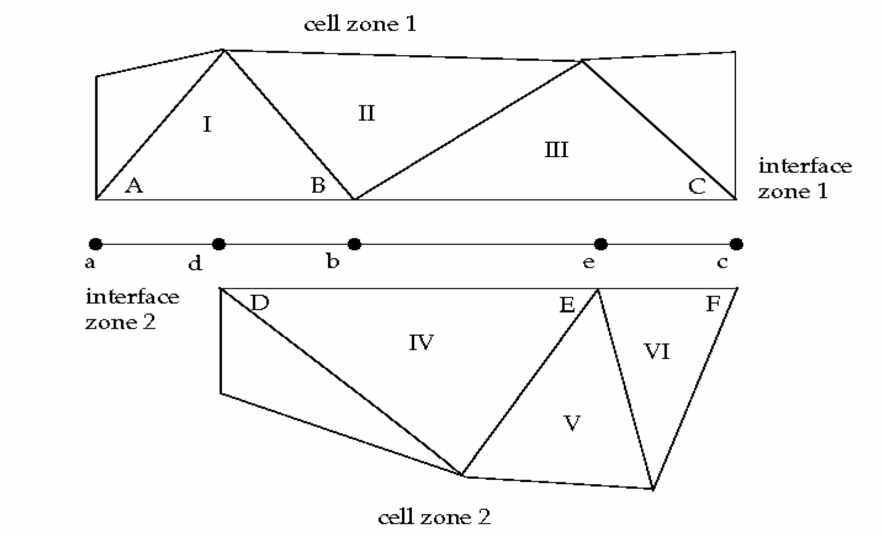


Figure 3:二维非一致网格界面

非一致网格的所需条件与限制：

- 如果两个交界面的边界具有相同的几何形状，网格界面可以是任何外形（包括三维中的非平面表面）。如果网格中有尖锐的特征（比如 90 度的角），交界面的两边都应该遵从这一特征。
- 如果创建的是非一致边界分隔的区域组成的多重单元区域构成的网格，你必须保证每一

单元区域在非一致边界有清楚的界面。相邻单元区域的表面区域将会具有相同的位置和外形，但是其中一个会符合一个单元区域，另一个会符合另一个单元区域。(注意：此时也可能为每一个单元区域创建一个独立的网格文件，然后将它们合并。)

- 必须定位网格文件以便它在两边都有流体单元。在流体和固体区域的交界处不能够有非一致边界。
- 在创建非一致界面之前，所有的周期性区域必须正确定向（平移或旋转）。
- 对于三维问题，如果界面是周期性的，在相邻界面只能有一对周期性边界

使用非一致 FLUENT/UNS 和 RAMPANT 算例请参阅 FLUENT/UNS 或 RAMPANT 启动的相关内容。

在 FLUENT 中使用非一致网格

如果你的多重区域网格包括非一致边界，你必须遵循下面的步骤（首先要保证网格在 FLUENT 中可用）以保证 FLUENT 可以在你的网格上获取一个解。

1. 将已经合并后的网格读入 FLUENT。(如果还没合并请参阅有关网格合并的内容)。
2. 将网格读入之后，将组成非一致边界的承兑区域的类型改为界面。菜单为 Define/Boundary Conditions...。
3. 在网格界面面板中定义非一致网格界面(Figure 1)，菜单为 Define/Grid Interfaces...。

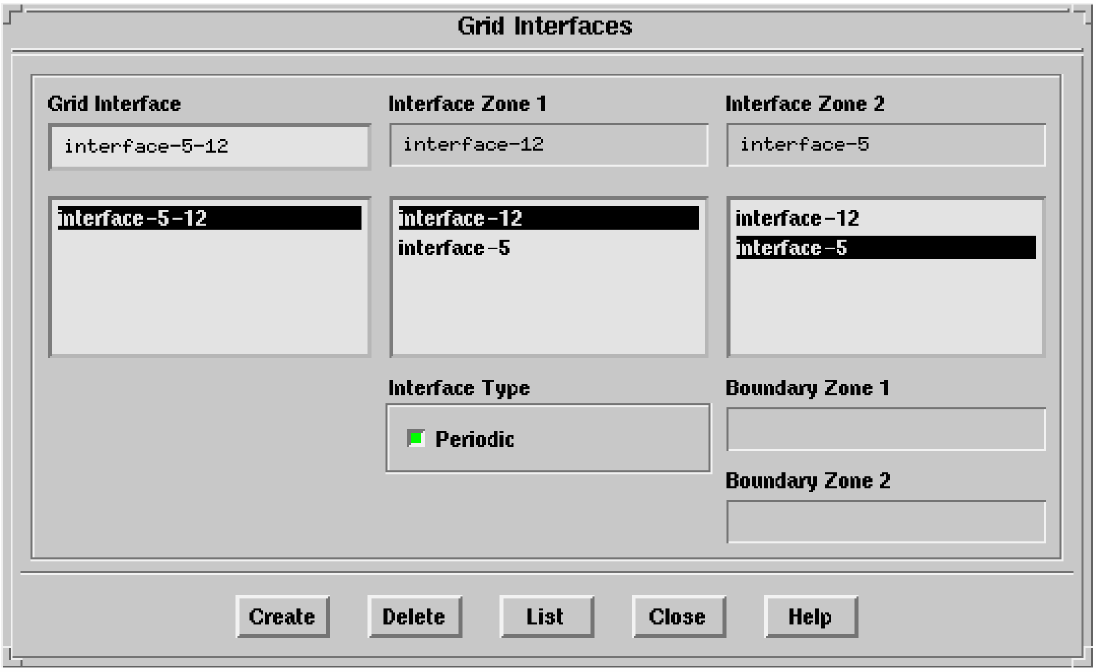


Figure 1: 网格界面面板

1. 在网格界面区域输入界面的名字。
2. 在界面区域的两个列表中制定组成网格界面的两个界面区域。注意：如果你的一个界面区域比另一个小，你应该把较小的界面指定为界面区域一以提高交界面计算的精度。
3. 对于周期性问题，点击界面类型选框以使其他类型无效。
4. 点击创建按钮来创建新的网格界面
5. 如果两个界面区域没有完全重合，检查边界的非重叠部分的边界区域类型。如果边界类型不对，你可以用边界条件改变它。如果你创建的网格界面不正确，可以选中然后删除它(此时界面创建所产生的任何边界区域都会被删除)。然后你可以像通常一样处理问题

的设定。

从 FLUENT/UNS 或者 RAMPANT Case 开始

具有非一致界面的 FLUENT/UNS 和 RAMPANT 可以不加任何变化的用于 FLUENT。然而你可能会想重新计算网格界面以利用 FLUENT 的优点提高交界面处的计算，此时你就不能简单的删除原来的网格界面然后重新计算，你必须使用 define/grid-interfaces/recreatetext 命令。选择这个命令之后， FLUENT 会在区域内重新创建所有网格界面，然后就可以像通常一样处理问题的设定。注意：如果你有非一致算例的 FLUENT/UNS 或者 RAMPANT data 文件你必须在使用创建命令之前将它读入。

检查网格

FLUENT 中的网格检查提供了区域扩展、体积统计、网格拓扑结构和周期性边界的信息，单一计算的确认以及关于 X 轴的节点位置的确认（对于轴对称算例）。蔡单为：Grid/Check。注意：我们推荐读入解算器之后检查网格的正确性，以在设定问题之前检查任何网格错误。

网格检查信息

网格检查信息会出现在控制台窗口。下面是一个例子。

```
Grid Check
 Domain Extents:
   x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 6.400001e+01
   y-coordinate: min (m) = -4.538534e+00, max (m) = 6.400000e+01
 Volume statistics:
   minimum volume (m3): 2.782193e-01
   maximum volume (m3): 3.926232e+00
     total volume (m3): 1.682930e+03
 Face area statistics:
   minimum face area (m2): 8.015718e-01
   maximum face area (m2): 4.118252e+00
 Checking number of nodes per cell.
 Checking number of faces per cell.
 Checking thread pointers.
 Checking number of cells per face.
 Checking face cells.
 Checking face handedness.
 Checking element type consistency.
 Checking boundary types:
 Checking face pairs.
 Checking periodic boundaries.
 Checking node count.
 Checking nosolve cell count.
 Checking nosolve face count.
```

Done.

区域范围列出了 X、Y 和 Z 坐标的最大值最小值，单位是米。体积统计包括单元体积的最大值、最小值以及总体积，单位是立方米。体积为负值表示一个或多个单元有不正确的连接。通常说来我们可以用 Iso-Value Adaption 确定负体积单元，并在图形窗口中察看它们。进行下一步之前这些负体积必须消除。

拓扑信息首先是每一单元的面和节点数。三角形单元应该有三个面和三个节点，四面体单元应该有四个面和四个节点，四边形单元应该有**四个面**和四个节点，六面体单元应该有六个面和八个节点。

下一步，每一区域的旋转方向将会被检测，区域应该包含所有的右手旋向的面。通常有负体积的网格都是左手旋项。在这些连通性问题没有解决之前是无法获得流动的解的。

最后的拓扑验证是单元类型的相容性。如果不存在混合单元（三角形和四边形或者四面体和六面体混合），FLUENT 会确定它不需要明了单元类型，这样做可以消除一些不必要的工作。

对于轴对称算例，在 x 轴下方的节点数将被列出。对于轴对称算例来说 x 轴下方是不需有节点的，这是因为轴对称单元的体积是通过旋转二维单元体积得到的，如果 x 轴下方有节点，就会出现负体积。

对于具有旋转周期性边界的解域，FLUENT 会计算周期角的最大值、最小值、平均值以及规定值。通常容易犯的错误是没有正确的指定角度。对于平移性周期边界，FLUENT 会检测边界信息以保证边界确实是周期性的。

最后，证实单一计算。FLUENT 会降解算器所建构的节点、面和单元的数量与网格文件的相应声明相比较。任何不符都会被报告出来。

网格统计报告

网格读入到 FLUENT 中之后有几种方法报告它的信息，你可以报告当前问题的内存使用信息，网格的尺寸，网格分割的统计也可以报告一个区域接一个区域的单元和表面的统计数据。

网格尺寸

点击菜单 Grid/Info/Size 你可以输出节点数、表面数、单元数以及网格的分区数。网格的分区是并行处理所需要的功能。

下面是一个输出的结果

Grid Information

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	48	82	35	1

如果你对于不同区域内有多少节点和表面被分开有兴趣，请点击菜单 Grid/Info/Zones

如果你用的是耦合显式解，将会在每个网格层面的信息。网格层面的信息源于 FAS 多重网格加速方法所产生的粗糙网格层面。下面是一个输出结果：

Grid Information

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	48	82	35	1
1	18	52	0	1
2	7	37	0	1

3	3	27	0	1
4	1	20	0	1

内存使用

在计算进程中你可能想要知道内存的使用和分配情况，FLUENT 可以报告下面的信息：节点数、表面数、边缘数以及目标指示器（各种网格和图形效用的指示器）所使用和分配的内存，阵列内存（表面所使用的高速暂存存储器）数量的分配和使用以及解处理时所用的内存。菜单： Grid/Info/Memory Usage。

UNIX 和 Windows NT 系统的内存信息是不同的

UNIX 系统：

- 处理器静态内存本质上是代码本身的大小
- 处理器动态内存用于存储网格变量和解变量的分配 heap 内存。
- 处理器总内存是静态内存和动态内存之和。

Windows NT 系统

- 处理器物理内存是当前贮存在 RAM 中的 heap 内存
- 处理器虚拟内存是当前与 Windows NT 系统页面交换的 heap 内存
- 处理器总内存是物理内存和虚拟内存之和。

注意：

- 内存信息不包括静态（代码）信息
- 在一系列版本的 FLUENT 中，heap 内存值包括解算器（网格和解变量）的存储以及程序外壳（图形用户界面，和图形内存）的存储，这是因为程序外壳和解算器在同一过程中。
- 在并行版本中，外壳运行自己的过程，所以 heap 内存值只包括网格和解变量的存储。

在 Windows NT 系统中，你可以在 FLUENT 运行过程中通过任务管理器获取更多的信息。在一系列版本中内存进程的名字好像是 fl542s.exe。对于并行版本内存进程的名字分别为：cx332.exe (外壳)，fl542.exe (解算器主机)和 fl_smpi542.exe (一个解算器节点)。

网格区域信息

点击菜单 Grid/Info/Zones 你可以在控制台窗口输出每一区域的节点、表面和单元的信息。网格区域信息包括节点总数，以及对于每一个表面和单元区域来说的表面和单元数、单元的类型，边界条件类型，区域标志等。下面是一个网格区域信息的例子：

```
Zone sizes:
   21280 hexahedral cells, zone    4.
     532 quadrilateral velocity-inlet faces, zone    1.
     532 quadrilateral pressure-outlet faces, zone    2.
    1040 quadrilateral symmetry faces, zone    3.
    1040 quadrilateral symmetry faces, zone    7.
   61708 quadrilateral interior faces, zone    5.
    1120 quadrilateral wall faces, zone    6.
   23493 nodes.
```

划分（Partition）统计

获取划分统计的信息请点击菜单 Grid/Info/Partitions menu item.。

统计包括单元数，表面数，界面数和与每一划分相邻的划分数。注意我们也可以在划分网格面板点击输出划分按钮生成这个报告。

修改网格

网格被读入之后有几种方法可以修改它。你可以标度和平移网格，可以合并和分离区域，创建或切开周期性边界。除此之外，你可以在区域内记录单元以减少带宽。还可以对网格进行光滑和交换处理。并行处理时还可以分割网格。

注意：不论你何时修改网格，你都应该保存一个新的 case 文件和数据文件（如果有的话）。如果你还想读入旧的 data 文件，也要把旧的 case 保留，因为旧的数据无法在新的 case 中使用。

标度网格

FLUENT 内部存储网格的单位是米——长度的国际单位。网格读入时她回假定网格的长度单位是米，如果你创建网格是使用的是其它长度单位，你必须将网格的标度改为米。具体内容可以参阅单位系统一章。

标度也可以用于改变网格的物理尺寸，虽然这不是单位系统设计的初衷，但是，我们的确可以适当的使用单位系统来改变网格的尺寸，具体的方法，相信每一个聪明人都猜得到了吧。注意：无论你打算以何种方式标度网格，你必须在初始化流场或开始计算之前完成网格的标度。在你标度网格时，任何数据都会无效。点击菜单 Grid /Scale...，出现下面的面板：

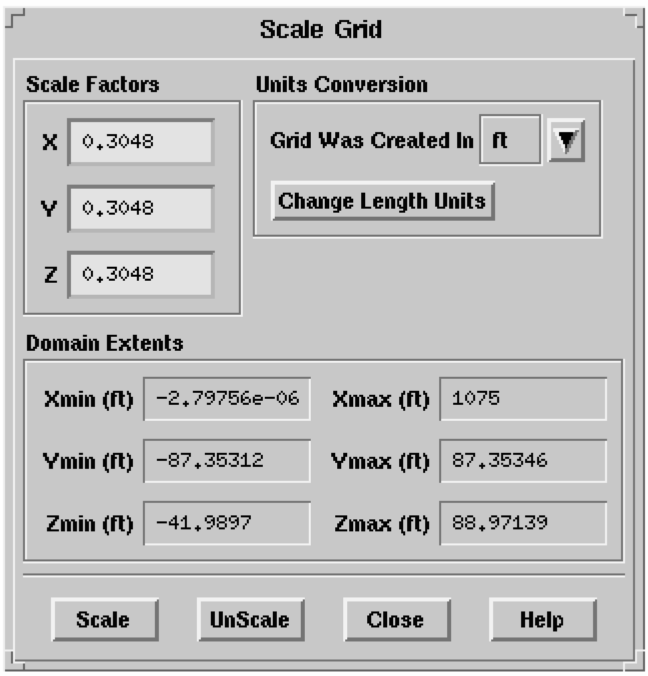


Figure 1:标度网格面板

使用标度网格面板步骤如下：

1. 在下拉列表中，选择适当的在被创建网格中的厘米、毫米、英寸和英尺的缩写来标明单位。标度因子会自动被设为正确值（比如 0.0254 米/英寸或者 0.3048 米/英尺）如果你

所用的单位不再列表中，你可以手动自己输入标度因子（比如米/码的因子）。

2. 点击 Scale 按钮。区域范围会被自动更新并以单位米输出正确的范围。如果还是宁愿在 FLUENT 进程中使用最初的单位，你可以标度网格面板改变单位
3. 正如第二步中使用网格标度面板所提到的，当你不改变单位标度网格，你只是转换网格点的最初尺寸，转换方法就是网格坐标乘以转换因子。如果你想要在最初的单位下工作而不将单位改为米，你可以在设定单位面板中点击改变长度单位按钮。点击按钮之后区域范围就会被更新以表明最初单位的范围。这一单位在将来输入的时候将一直使用！

如果你使用了错误的标度因子，偶然点击了标度按钮两次或者就是想重新标度，你可以点击 UnScale 按钮。"Unscaling"用标度因子去除所有的节点坐标。(在创建的网格中选择 m 并且点击 Scale 按钮将不会重新标度网格。)

你也可以使用网格标度面板改变网格的物理尺寸。例如，你的网格是 5 英寸×8 英寸，你可以设定标度因子为 2 得到 10 英寸×16 英寸的网格。

平移网格

你可以指定节点的笛卡尔坐标的偏移量来平移网格。如果网格是通过旋转得到的而不是经过原来的网格得到的，这将对旋转问题很必要。对于轴对称问题，如果网格的设定是由旋转设定而与 x 轴不一致那么这对旋转问题也很必要。如果你想将网格移到特定的点处（如平板的边缘）来画一个距 x 轴有一定距离的 XY 图。

点击菜单 Grid/Translate 弹出平移网格面板（下图）可以平移网格：

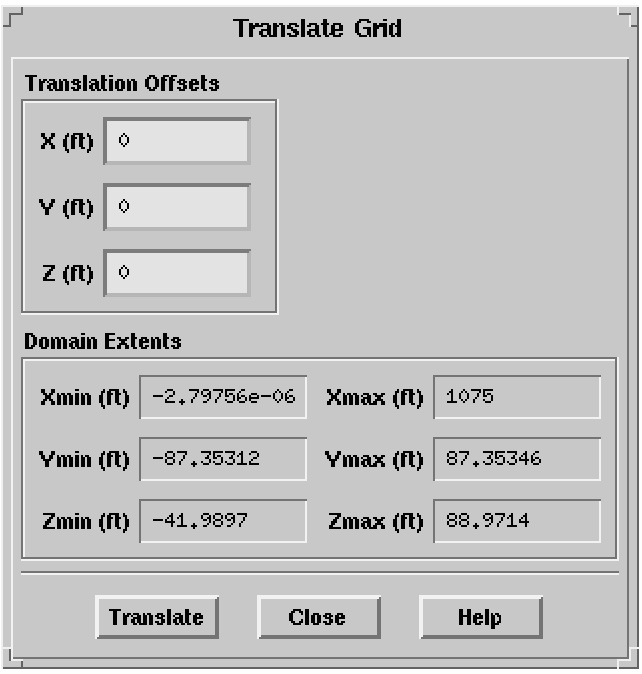


Figure 1: 平移网格面板

使用平移网格面板平移网格步骤如下：

1. 输入偏移量（可以是正负实数）
2. 点击平移按钮，下面的区域范围不可以在这个面板中改变。

合并区域

为了简化解的过程你可能会将区域合并为一个区域。合并区域包括将具有相似类型的多重区

域合并为一个。将相似的区域合并之后，会使设定边界条件以及后处理会变得简单。
点击菜单 Grid/Merge...弹出合并网格面板如下：

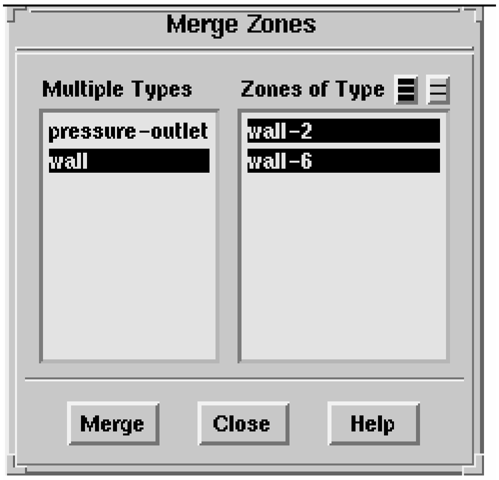


Figure 1: 合并区域面板

什么时候合并区域

FLUENT 允许你将相似类型的区域合并为一个。除非区域的数量已经限制了设置的速度以及数值分析的后处理，否则区域合并是不必要的。例如：对于大量的区域设定相同的边界条件会消耗很多时间而且会消除不相容性。除此之外，数据的后处理通常包括使用区域生成表面的过程，大量的区域被转换成大量的表面，每一个表面都需要设定各种类型的选项，如颜色等值线，这会消耗大量的时间。幸好现在我们可以将表面合并从而尽量减小太多区域造成的负面影响的而高后处理过程的效率。

虽然合并区域很有用但是有些情况下你就是需要保持大量的区域。这是因为合并区域的过程是不可逆的，大量的区域使得强制（imposing）边界条件的设定更灵活。虽让大量的区域会使得表面的选择单调乏味，但是在表现网格和流场解的时候有更多的选择。例如，产生内部流场解可能很难，如果外部流域是由几个区域组成，这些区域的网格的相关子集可以随着解一起画出来以提供几何外形和解域的相关性。

使用合并区域面板将相同类型的区域合并为一个的步骤如下：

1. 在多重区域列表选择区域类型。这一列表中包多重区域的所有类型。当你选择区域类型之后，相应的区域就会在区域列表中出现。
2. 在区域列表中选择选择两个以上的区域
3. 点击合并按钮，合并所选区域

注意：一定要记住保存新的 case 文件和数据文件（如果数据文件存在）

分割区域

FLUENT 中有几种方法来将单一表面或者单元区域分为多个同一类型的单元。如果你想将一个区域分为几个更小的区域你就可以使用这个功能。例如：对管道创建网格时，你创建了一个壁面区域，而这些壁面区域在不同的位置有不同的温度，你就需要将这个壁面区域分为两个以上的小区域。如果你想用滑动网格模型或多重参考坐标来解决问题，但是你忘记了为具有不同滑动速度的流体区域创建不同的区域，你就需要将这个区域分割。

注意：在任何分割处理之后你都应该保存一个新的 case 文件。如果数据文件存在当分割开始时它们会自动分配到适当的区域，所以你要保存新的数据文件

表面区域有四种分割方法，单元区域有两种分割方法。下面先介绍表面区域的分割方法，然后是单元分割工具的介绍。周期区域的裁剪将在后面介绍。注意：所有的分割方法在你决定分割之前都可以报告分割的结果。

分割表面区域

对于有尖角的几何区域，在具有明显角度的基础上我们很容易分割表面区域。由角度大于或等于特定角度的具有法向矢量的表面会和小于特定角度的表面分为不同的区域。例如，你有一个由立方体组成的网格，立方体的所有六个边都在同一壁面区域，你可以指定特征角为 89 度。因为每一立方体的边的法向矢量由相边的法向 90 度分开，六个边会被分别放在六个壁面区域。如果你有一个小的表面区域，并且想将区域内的每一个表面放到它自己的区域，你就可以在表面的基础上通过分割表面实现。

你也可以在保存在适应寄存器中的标号分割表面区域。比如：你可以在单元所在区域位置（区域适应）的基础上为了适应而标记单元，或者在它们狭窄的边界（边界适应）或者在一些变量等值线或者在其它的适应方法的基础上标记单元（有关适应的内容请参阅相关章节）。当你指定了表面区域分割的寄存器，所有的被标记的单元表面将会放到同一个新区域。（关于你所要使用的寄存器的 ID，你可以使用管理寄存器面板来确定）

最后，你可以在连续性区域的基础上分割表面区域。例如：当你使用耦合边界条件，你需要区域内的表面有一致的方向。一致的方向只能在连续性区域保证，所以你需要将表面区域分开以保证指定适当的边界条件。使用角度、表面、适应标志或者区域来分割表面区域，请使用分割表面面板(Figure 1)。点击菜单 Grid/Separate/Faces...有如下面板：

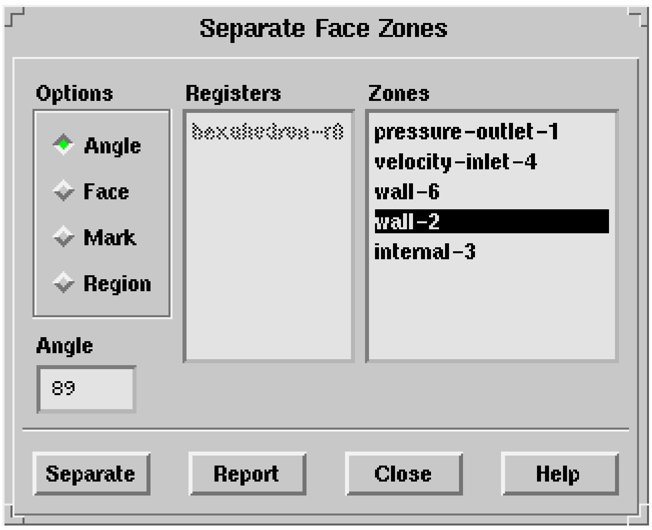


Figure 1:分离表面区域面板

注意：你应该在使用悬挂节点适应方法（默认）进行任何适应之前，先分割表面区域。包含悬挂节点的区域不能分割。

分离表面区域的步骤：

1. 选择分离方法(Angle, Face, Mark, 或者 Region)
2. 在区域列表中选择要分离的区域
3. 如果你用表面或者区域分割请跳到下一步，否则请遵照下面的步骤
   - 如果要用角度分割表面，请在角度集合中指定特征角。

- 如果你用标记分割表面，选择在寄存器列表中选择所要使用的适应寄存器。

4. （此步可选）在分割之前要检查分割结果请点击 Report 按钮，出现与下面类似的内容：

Zone not separated.
45 faces in contiguous region 0
30 faces in contiguous region 1
11 faces in contiguous region 2
14 faces in contiguous region 3
Separates zone 4 into 4 zone(s).

5. 分离表面区域，请点击 Separate 按钮，FLUENT 会输出下列信息：

45 faces in contiguous region 0
30 faces in contiguous region 1
11 faces in contiguous region 2
14 faces in contiguous region 3
Separates zone 4 into 4 zone(s).
Updating zone information ...
　created zone wall-4:001
　created zone wall-4:002
　created zone wall-4:010
done.

当你使用适应标志分割网格时，你有时可能会发现表面的网格单元会放在错误的表面区域，你可以用附加的分割方法在角度的基础上解决该问题而将错误的单元放进新的区域。然后你可以将新区域和所要放的区域结合起来。

分割单元区域

如果你有两个及其以上共用内部边界的被包围的单元区域（如下图），但是所有的单元被包含在一个单元区域，你可以用区域分割方法将单元分割为不同的区域。注意，如果共用边界的类型是内部类型，你必须在分割之前把它们改为双边表面区域类型。

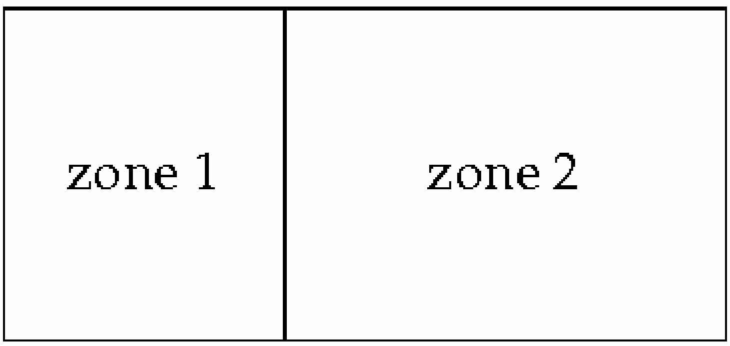


Figure 1: 在区域的基础上分割单元区域

你也可以用适应寄存器中的标志分割单元区域。你可以使用网格适应一章的任何一种适应方法标记单元。当你指定了分割单元区域的寄存器之后，被标记的单元会放在新的单元区域（使用管理寄存器面板确定你所要使用的寄存器的 ID）。要在区域或适应标志的基础上分割单元区域，请点击菜单：Grid/Separate/Cells..弹出如下面板：

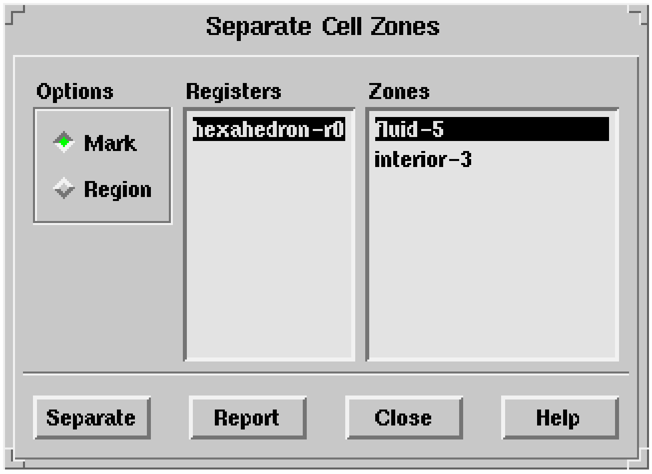


Figure 2: 分割单元区域面板

注意：你应该在使用悬挂节点适应方法（默认）进行任何适应之前，先分割表面区域。包含悬挂节点的区域不能分割。

分离表面区域的步骤：

1. 选择分离方法(Mark 或者 Region)
2. 在区域列表中选择要分离的区域
3. 如果你用标志分割区域，在寄存器列表中选择适应寄存器。
4. 此步可选）在分割之前要检查分割结果请点击 Report 按钮，出现与下面类似的内容：

Zone not separated.

Separates zone 14 into two zones, with 1275 and 32 cells.

5. 分离表面区域，请点击 Separate 按钮，FLUENT 会输出下列信息：

Separates zone 14 into two zones, with 1275 and 32 cells.

No faces marked on thread, 2

No faces marked on thread, 3

No faces marked on thread, 1

No faces marked on thread, 5

No faces marked on thread, 7

No faces marked on thread, 8

No faces marked on thread, 9

No faces marked on thread, 61

Separates zone 62 into two zones, with 1763 and 58 faces.

All faces marked on thread, 4

No faces marked on thread, 66

Moved 20 faces from face zone 4 to zone 6

Updating zone information ...

Moved 32 cells from cell zone 14 to zone 10

created zone interior-4

created zone interior-6

created zone fluid-14:010

done.

如上例所示，单元区域的分离通常也会表面区域的分割。如果你用标志分割，被移到新区域的表面单元将会放在新的表面区域。当你用区域分割时，被移到新区域的表面单元将不必被放在新的表面区域。如果任何表面被放错，请参阅分割表面区域一节。

创建周期区域

如果两个区域有相同的节点和表面分布，你可以将这对表面区域耦合来为网格分配周期性。在前处理过程中，你必须保证所要分配周期性边界的两个区域具有相同的几何图形和节点分布，也即它们是相互的复制。这是在解算器中创建网格周期性区域的唯一需要，两个区域的最初边界类型是不相关的。

注意：在创建和裁剪周期性边界条件之后，保存新的 case 文件（如果有数据文件也要保存）。要匹配一对边界条件，请使用如下创建周期性文本命令：Grid/modify-zones/make-periodic。你需要指定组成匹配的成对边界条件的两个表面区域（你可以输入它们的全名或仅仅是他们的 ID，并指出它们是旋转性还是平移性边界条件。你指定周期性区域和该周期的匹配域（shadow）的顺序并不重要。

```
/grid/modify-zones> mp
Periodic zone [()] 1
Shadow zone [()] 4
Rotational periodic? (if no, translational) [yes] n
Create periodic zones? [yes] yes
  computed translation deltas: -2.000000 -2.000000
  all 10 faces matched for zones 1 and 4.
  zone 4 deleted
Created periodic zones.
```

当你创建周期性边界时，解算器会检查所选区域内的表面是否匹配（也就是说相应表面的节点是否一致）。表面匹配的公差是表面边缘最小长度的分数倍。如果周期性边界条件创建失败，你可以用 matching-tolerance 命令改变匹配公差，但是匹配公差不可以超过 0.5，否则周期性区域匹配将不正确，并且会破坏网格。菜单：Grid/modify-zones/matching-tolerance。

剪裁（slit）周期性区域

如果你想将周期性成对区域解耦你可以使用剪裁周期性命令：Grid/modify-zones/slit-periodic。然后你指定周期性区域的名字或者 ID，解算器就会将两个区域解耦，然后将它们改为两个对称性区域。

```
/grid/modify-zones> sp
periodic zone [()] periodic-1
Separated periodic zone.
```

熔合（Fusing）表面区域

在组合多重网格区域之后，表面熔合是一个很方便的功能，它可以将边界熔合将节点和表面合并。当区域被分为子区域，并且每一个子区域分别产生网格时，你需要在将网格读入解算器之前，把子区域结合为一个文件。(详细内容请参阅多重网格文件一节。比如说：在你产生多块网格的每一块并且将它们分别保存在不同的网格文件中，或者在网格生成过程中，为复杂几何图形的每一部分保存一个网格文件（注意：在子区域接触的位置，网格节点的位置在边界处不必相同，具体内容请参阅非一致网格一节），就需要熔合表面区域。点击

菜单 Grid/Fuse...弹出下面面板，允许你将双重节点合并，并将人工内部边界删除。

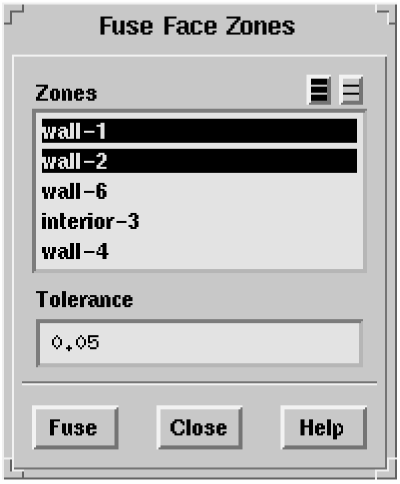


Figure 1: 熔合表面区域面板

如读入多重网格文件一节所叙述的，当网格文件被合并起来时，双重节点所在的边界被分配给区域 ID 号（就像任何其它边界一样)。你需要在 tmerge 或者 TGrid 报告过程中明了区域的 ID 号，或者当全部的网格被读入之后，显示所有边界网格区域并用鼠标指针按钮确定边界的名字（详细内容请参阅关于鼠标按钮函数信息控制的鼠标按钮函数)。

熔合表面区域所需要输入的东西

熔合表面区域的步骤如下：

1. 在区域列表中选择要熔合的区域。
2. 点击 Fuse 按钮熔合所选区域。

如果使用默认公差没有熔合所有适当的表面，你应该增加公差尝试重新熔合。(这一公差和创建周期性区域所讨论的匹配公差一致)。公差不应该超过 0.5，或者你可能熔合了错误的节点。千万要记住熔合表面之后保存新文件!!!

结构网格生成器或解算器读入的网格通常只能是具有凹角分支切口的 O 型或者 C 型网格，在这个切口上一致的双重节点在一个周期性边界。因为 FLUENT 使用非结构网格，所以不必保留人工内部边界。(当然你可以保持周期性边界，解算器就会使用周期性边界条件来解决问题)。

要让周期性区域自己熔合，你必须首先裁剪边界区域。这将会创建可以融合的对称性区域。注意：如果你需要熔合非周期性区域的部分和它自己，你必须使用文本命令：fuse-face-zones，菜单：Grid/modify-zones/fuse-face-zones。这一命令会提示你确定所要熔合区域的名字或者 ID（你需要输入同一区域两次）。改变节点公差请使用匹配公差（matching-tolerance）命令。

剪开表面区域

剪开表面区域功能有两种用途：

- 你可以将任何双边类型的单一边界区域剪开为两个不同的区域。
- 你可以将耦合壁面区域剪开为两个不同的非耦合壁面区域

当你剪开表面区域，解算器会将除了在区域的二维端点或三维边缘节点以外的所有的表面和节点复制。一组节点和表面将会属于剪开之后的一个边界区域，其它的在另一个区域。

每一个端点的共享节点的唯一坏的影响就是，当你用裁剪边界图形化显示数据解时，你会在那些点处看到一些错误。（注意：如果你裁剪完边界之后，你将不能再将边界熔合。）

一般说来，你不必手动剪彩表面区域。说边避免会被自动裁剪党仍然保持耦合（这一耦合只涉及网格，不涉及热耦合）。适应过程将这些周期性边界看成耦合壁面；在一个壁面的适应导致了在 shadow 处的相同适应。如果你想要独立于壁面的 shadow 适应一个壁面，你应该裁剪耦合壁面来获得两个不同的壁面。

你不可以混淆剪开表面"slitting"和分割表面"separating"命令。剪开表面是指，剪开表面后附加的表面和节点被创建并放到新的区域。分离表面是指新的区域将会被创建，新的节点和表面不会被创建，原表面和节点简单的重新分配到区域中。

剪开表面区域所需要输入的内容

要剪开表面使用下面命令：Grid/modify-zones/slit-face-zone。指定表面区域的名字或 ID，解算器会用两个区域替换原区域。

```
/grid/modify-zones> slfz
face zone id/name [] wall-4
  zone 4 deleted
  face zone 4 created
  face zone 10 created
```

千万要记住：剪开表面后记住保存新文件，case 和 data 文件不管有哪个都要保存。

记录流域（Domain）和区域（Zones）

记录区域可以通过重新排列内存的节点、表面以及单元提高解算器的计算性能。Grid/Reorder 包含重新记录 domain 和 zones 的命令，并且能够输出目前网格划分的带宽。Domain 的记录可以提高内存的读写效率，并且可以为用户界面很方便的记录区域。带宽提供了察看内存中的单元分布。

记录区域菜单：Grid/Reorder/Domain

最后，你选择输出带宽菜单，输出目前网格的划分。这一命令输出每一网格划分的半带宽和最大的存储距离。菜单：Grid/Reorder/Print Bandwidth。每次做这些操作时，一定要记住保存新的文件！

关于记录

反 Cuthill-McKee 算法被用于记录过程，来创建区域内种子单元（seed cell）的层次树。首先使用 Gibbs, Poole,和 Stockmeyer[57]算法选择一个单元（被称为种子单元）。然后每一单元根据它距种子单元的距离被分配给一定的层次。这些层次被分配组成层次树。一般说来，表面和单元被记录以便于邻近单元在区域和内存之中是相互靠近的。因为大多数计算循环是在表面上的，所以你希望高速缓存中的两个单元在同一时刻，以减少缓存或者磁盘扫描的时间，也就是说，你希望在内存中的单元相互靠近以减少内存存取的时间。目前的格式记录了区域内的表面和单元以及内存中的节点、表面和单元。

你也可以选择记录这些区域，记录的区域首先是区域类型然后是区域的 ID。使用用户界面可以很方便地实现区域记录。

使用区域记录的典型输出如下：
>> Reordering domain: zones, cells, faces, done.
    Bandwidth reduction = 809/21 = 38.52
    Done.
如果你想察看带宽，可以看到如下报告：
Maximum cell distance = 21

带宽是相邻单元的最大差值，也就是说，在区域列表中的每一单元顺次标号，并比较这些索引的差别。

并行处理的网格分割

如果你打算使用 FLUENT 的并行解算器，你应该将网格划分或者再细分为成组的单元，以便于它们可以在并行处理器上得到解决（见 Figure 1）。划分可以采用 FLUENT 的一系列版本，也可以采用划分转换器。划分网格之后，请保存 case 文件并将它们读入到并行解算器中。一个被划分的网格可以被用于系列解算器中而不会丧失任何性能。如果你的主机工作站有足够的内存，你可以用划分转换器将网格直接读入到 FLUENT 中。然而如果你的网格太大而不能读入到系列解算器中也不能读入到划分转换器中，或者你不想自己划分网格，你可以将未划分的网格直接读入的并行解算器中，解算器会自动使用"Cartesian Strip"方法对它进行划分（这种方法没有前述两种方法好）。

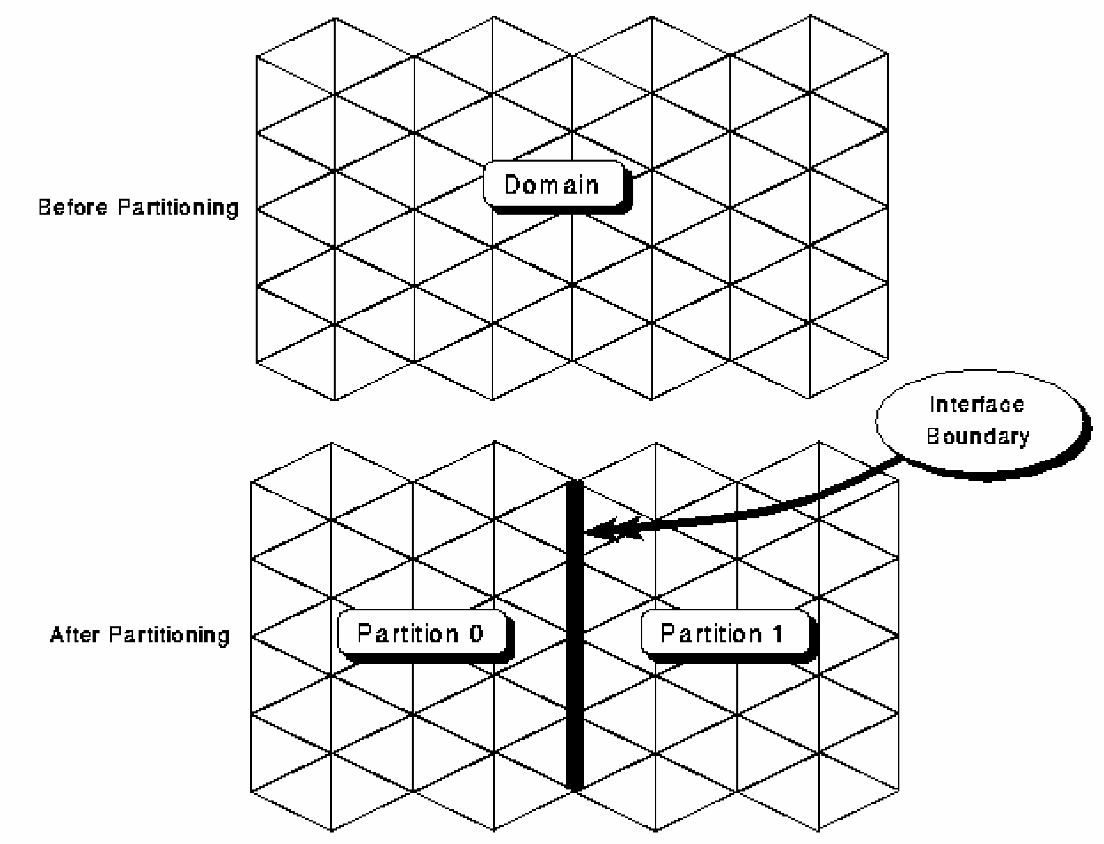


Figure 1: 划分网格

网格划分方法

并行处理的网格划分有三个目的

- 用等量单元创建划分

- 最小化划分界面的数量，也就是减少划分边界表面的面积
- 最小化相邻划分的数量。

平衡划分（使单元数量相等）保证每个处理器的负载相等，并保证各个划分在同一时间进行信息传递。因为划分之间的信息传递是相对耗时的过程，最小化界面的数量可以减少数据交换的时间。最小化划分邻域的数量可以减少网络和路由的竞争机会。除此之外，在初始信息传递的花费比更长信息的传递的花费更多的机器上，最小化划分邻域是十分重要的，尤其是对于网络连接的工作站来说。

FLUENT 中的划分格式是使用对分算法来创建划分的，但是不像其它的划分格式需要划分因子为二，这一格式对划分的数量没有限制。对于每一个处理器来说，你要创建相同数量的划分（也就是说划分的数量应该是处理器数量的整数倍）

对分（Bisection）方法

网格划分采用对分算法。所选算法首先用于父区域的划分，然后再用于子区域的划分。比如说：要将网格划分为四个部分，首先对分为相等的两个部分，然后再将这两个相等的部分分别对分为两个更小的子部分。如果要划分三部分的话，首先将网格划分为三分之一为一部分，三分之二为另一部分，然后再将三分之二的部分对分为两个部分。

网格划分可以用下面的列出的任何一种方法。至于最为有效的方法视具体问题而定，所以你可以试用不同的方法，直到找出最好的方法为止。详细内容请看：推荐划分策略的网格划分指导方针。

笛卡尔轴：在单元的笛卡尔坐标的基础上对分区域(见 Figure 1)。它用垂直于坐标轴的最长的区域范围来对分区域和子区域。通常被称为坐标对分

笛卡尔带：使用笛卡尔坐标对分，但是所有的对分线都限制在父区域的最长对分线方向。这种方法通常可以最小化对分邻域的的数量

笛卡尔 X-, Y-, Z 坐标：在单元的笛卡尔坐标的基础上对分区域，但是它的父区域和子区域的对分线都垂直于特定的坐标方向(见 Figure 2.)。

笛卡尔 R 轴：对分的基础为单元中心到产生最小界面尺寸的距离的坐标轴的最短射线距离。这种方法只在三维网格中使用。

笛卡尔 RX-, RY-, RZ 坐标：对分的基础为单元中心到选定坐标轴的最短射线距离。

圆柱坐标：对分的基础为单元的柱坐标系,这种方法只在三维网格中使用。

圆柱 R-, Theta-, Z-坐标：对分的基础为选定的柱坐标系,这种方法只在三维网格中使用。

主轴：对分的基础为平行于主轴的坐标框架(见 Figure 3)。如果主轴平行于笛卡尔坐标轴 ，该方法就被简化为笛卡尔轴划分，这一算法也通常被称为动量、惯量或者惯量的动量划分。该方法是 FLUENT 默认的划分方法。

主带：使用动量划分，但限制在父区域最长的延长线的主轴方向(见 Figure 4)。通常用这种方法最小化划分邻域的数量。

主 X-, Y-, Z-坐标：划分的基础在于选定的主轴(见 Figure 4)。

极轴：划分的基础在于单元的极轴，这种方法只用于二维网格的划分。

极 R-轴、极 Theta-轴：划分的基础在于所选的极轴，只用于二维情况(见 Figure 5)。

球轴：划分是基于单元的球坐标系，只用于三维情况

球 Rho-, Theta-, Phi-坐标：划分基于所选的球坐标。只用于三维情况。

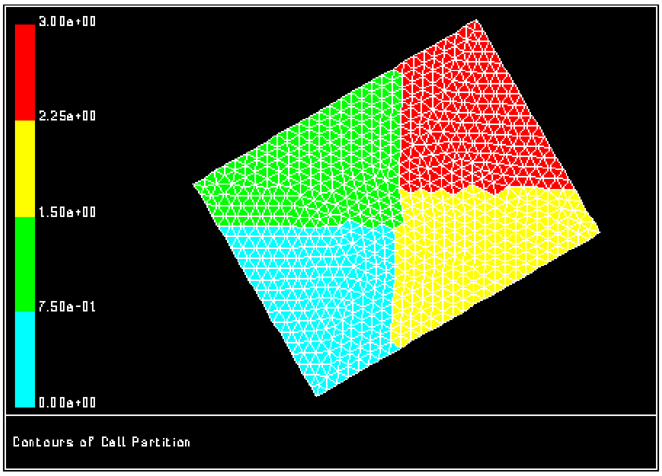


Figure 1: 笛卡尔轴方法

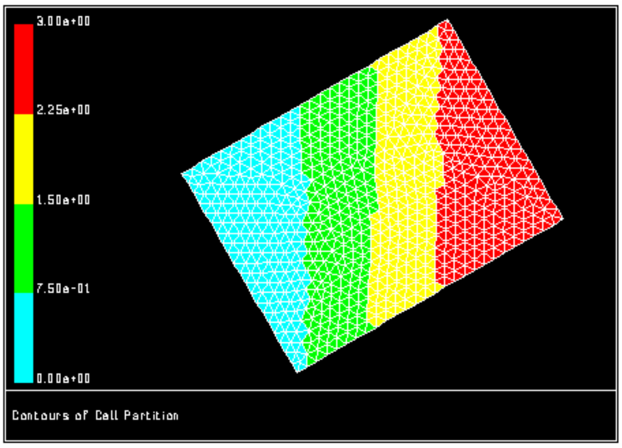


Figure 2:笛卡尔带或者笛卡尔 X-坐标方法

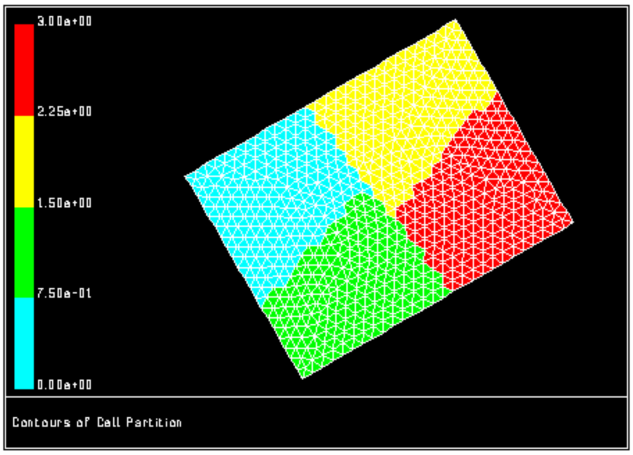


Figure 3:主轴方法

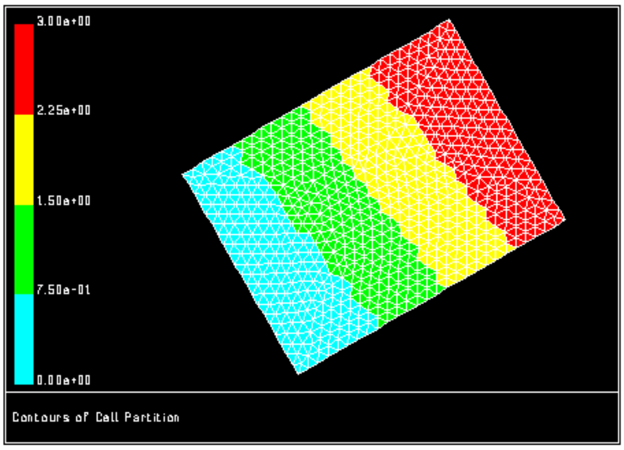


Figure 4:主带或者主 X-坐标方法

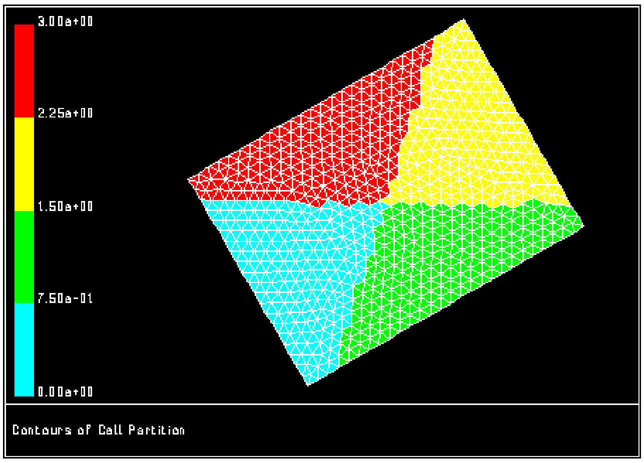


Figure 5:急轴或者极 Theta-坐标方法

最优化

附加的最优化可以提高网格划分的质量。垂直于区域最长宽度的的划分未必是产生最小界面边界的方法。“预先测试（pre-testing）”操作(见预先测试一节)可以用于划分之前自动选择最优方向。除此之外还有下面的反复迭代最优化方法：

光滑：通过交换划分之间单元来最小化划分界面的数量。这一格式详细研究了划分边界，而且如果界面边界表面减少，它会将单元给相邻的划分。(见 Figure 1)

合并：尝试消除每一划分的孤立丛。孤立丛是指这样一组单元，它们组内的每一个单元至少有一个表面与界面边界一致(见 Figure 2.)。孤立丛会降低多重网格的性能，并导致大量的信息交流而花费时间。

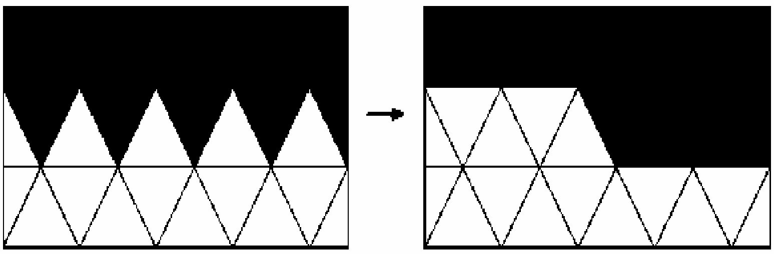


Figure 1: 光滑最优化方法

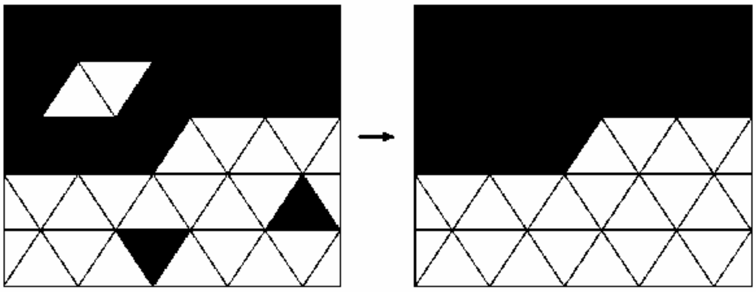


Figure 2: 合并最优化方法

一般说来，光滑和合并是相对耗费时间的最优化工具。

预先测试（Pretesting）

如果你选择主轴方法或者笛卡尔坐标方法，你可以提前检测不同对分方法来提高对分的性能，默认是不选择预先测试，此时 FLUENT 在垂直区域最长范围方向进行对分。

如果使用提前预测，当你在划分网格面板点击划分按钮时自动执行提前预测。对分算法，会检测所有的坐标方向并选择产生最少对分界面的算法为最后的对分算法。注意：使用提前预测会增加对分所需的时间，对于二维问题会花费二倍的时间，对于三维问题会花费四倍的时间。

在区域和寄存器中划分

将对分限制在单元区域或者寄存器可以使你灵活的在流域的子区域中应用不同的划分方法。例如：对于连接矩形管道的圆柱形通风系统，你可以用柱坐标轴方法划分圆柱形通风系统，用笛卡尔坐标轴方法划分矩形管道。如果圆柱形和矩形在两个不同的单元区域，你可以选择一个区域执行所需要的划分。如果它们在同一个单元区域，你可以用适应方法中标记单元的函数为每一个区域创建一个单元寄存器（基本上是一个单元列表）。这些寄存器允许你在物理位置，单元体积，特定变量的梯度或等值线等参数的基础上标记单元。关于为适应标记单元的信息请参阅网格适应一章。管理适应寄存器提供了操作不同寄存器创建新寄存器的的信息。一旦你创建了新的寄存器你就可以用它来进行网格划分了。

划分网格的指导方针

下面是划分网格的推荐步骤：

1. 用默认的划分方法（主轴划分）并最优化（光滑）。
2. 在解释划分统计中检查划分统计。你的目标是在保持平衡负载（单元变化）时实现界面比率变化和全局界面比率的最小值。如果统计不可接受可以选择其它的划分方法。
3. 如果对于你的问题已经选择了最好的对分方法，你就可以选择是否打开提前预测功能来进一步提高。
4. 如果需要的话，你也可以选择合并最优化方法提高划分的性能。

使用网格划分面板

对于网格划分，你可以选择创建网格划分的对分方法，设定划分数，选择区域和/或寄存器以及选择所要使用的最优化方法。有些方法，你可以执行提前预测功能保证尽可能好的划分。当你在网格划分面板中设定了所有参数，点击划分按钮将网格按照所选的方法和设定进行再细分。点击菜单 Grid/Partition...，弹出下面对话框：

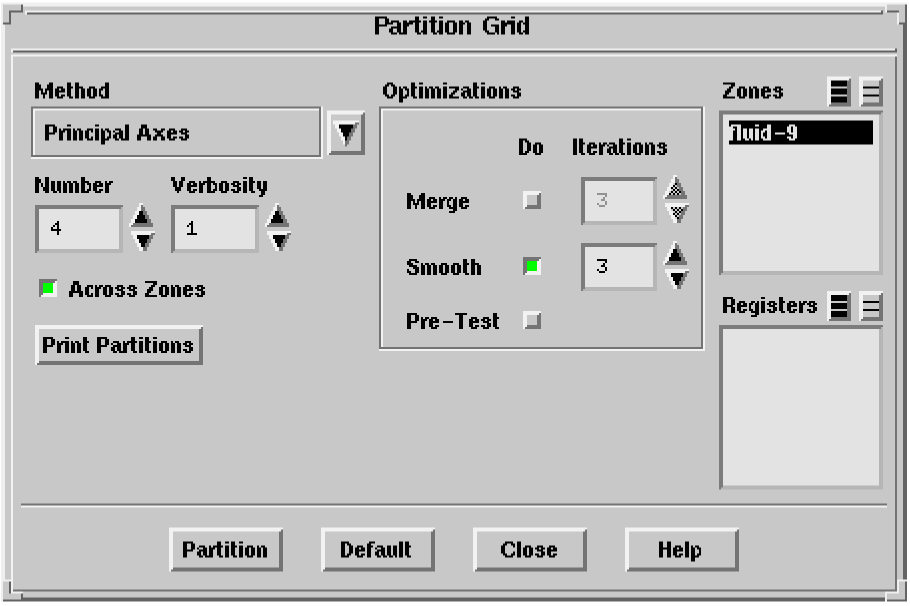


Figure 1:网格划分面板

1. 在方法下拉列表中选择对份方法。选择是对分方法中所描述的技巧。
2. 在 Number 框中输入要划分的的数量（必须是处理器数量的整数倍）。
3. 你可以选择在每一个单元区域独立应用划分，你也可以使用穿越区域检查按钮来允许划分穿越区域边界。除非在不同区域的单元需要大量的计算时间（比如包括固体和流体的区域），否则不推荐使用独立的单元划分（关掉区域检查按钮就可以实现独立的单元划分）。
4. 你可以在最优化条目中激活并控制所需的最优化方法。你也可以通过打开 Do 检查按钮来，激活合并和光滑格式。对于每一个格式你也可以选择重复的次数，这样，每一个最优化格式会被应用直到实现适当的判据或达到最大的重复步。如果重复步被设为零，最优化格式会被一直应用到最后，而没有最大重复步限制。
5. 如果你选择主轴方法、笛卡尔坐标或者笛卡尔带方法，你可以在划分执行之前应用不同对分方向的自动检测来提高划分的质量。（Pre-Test）
6. 在 Zones 和/或 Registers 列表中，选择你要划分的区域和/或寄存器。大多数情况下你会选择所有区域（默认情况）划分整个流域，详细内容请参阅在区域和寄存器内划分一节。
7. 点击划分按钮划分网格

在划分过程中报告划分信息

网格划分时，关于划分过程的信息会在文本（控制台）窗口中输出，解算器会输出所创建划分的数量，对分的数量，划分所需的时间，单元、表面、界面以及表面比率变化的最大值和最小值。Verbosity 的默认设定值是 1，如果你将它改为 2，那么控制台窗口还会输出所用的划分方法，划分的 ID，单元、表面和界面的数量以及每一划分的界面与表面的比值。如果 Verbosity 为 0，控制台窗口将只输出划分数量和所需时间。

划分完成后你可能需要这一报告的某一部分重新输出，你可以点击 Print Partitions 按钮，程序会自动在控制台窗口输出划分 ID，单元、表面和界面数以及每一划分的界面和表面的比率。除此之外还会输出单元、表面、界面以及表面比率变化的最大值和最小值。详情请见划分统计解释。

重置划分参数

如果你想改变划分参数的设定，你可以点击 Default 按钮回到 FLUENT 的默认设定。点

击默认设定之后，Default 按钮就变成了 Reset 按钮。Reset 按钮允许你回到最近保存的设定（也就是你点击 Default 按钮之前的设定值）。执行之后，Reset 按钮又会变成 Default 按钮。

划分统计解释

划分过程产生的输出包括循环的细分过程以及重复的最优化过程的信息。随后是最后划分网格的信息，包括：划分 ID，单元的数量，表面的数量，界面表面的数量，每一划分的界面和表面的比率，划分邻域的数量以及单元、表面、界面、邻域、平均单元、表面比率和全局表面比率的变化。全局表面比率的变化是指目前划分各自数量的最大值和最小值。例如，下面的输出，划分 0 和 3 具有最小的界面数(10)，划分 1 和 2 具有最大的界面数(19)，因此，变化为 10 – 19。

你的目标是实现界面比率变化和全局界面比率的最小值来平衡负载值（单元变化）。

>> Partitions:

P	Cells	I-Cells	Cell Ratio	Faces	I-Faces	Face Ratio	Neighbors
0	134	10	0.075	217	10	0.046	1
1	137	19	0.139	222	19	0.086	2
2	134	19	0.142	218	19	0.087	2
3	137	10	0.073	223	10	0.045	1

```
------
Partition count              = 4
Cell variation               = (134 - 137)
Mean cell variation          = (    -1.1% -      1.1%)
Intercell variation          = (10 - 19)
Intercell ratio variation    = (      7.3% -     14.2%)
Global intercell ratio       =       10.7%
Face variation               = (217 - 223)
Interface variation          = (10 - 19)
Interface ratio variation    = (      4.5% -      8.7%)
Global interface ratio       =        3.4%
Neighbor variation           = (1 - 2)

Computing connected regions; type ^C to interrupt.
Connected region count       = 4
```

要获取更多的划分信息，你可以画出网格划分的等值线，如对分方法 5 的 Figures 1 所示。在等值线面板的下拉菜单的 Cell Info...中关闭节点值的显示，选择单元划分。(关于等值线的显示请参阅画等值线与轮廓一节。)

使用划分转换器

运行并行 FLUENT 时，你可以通过划分转换器直接读入未划分的网格。菜单为：File/Import/Partition/Metis...。FLUENT 会使用过滤器划分网格，然后将划分后的网格读入到解算器中，划分的数量等于处理器的数量。然后你就可以处理模型定义和解法的定义。注意：这种直接读入的方法要求主机有足够的内存来运行特定网格的转换器。如果没有足够的内存，你需要在有足够内存的机器上运行划分网格转换器。当然也可以在具有足够内存的机器

上用转换器划分网格然后，然后将网格读入到主机中。在转换器中，手动划分网格请输入如下命令：tfilter partition input-filename partition-count output-filename。其中，partition-count 为所需划分的数量。然后将划分后的网格读入到解算器中进行模型的定义和解法的设置。

METIS 为默认的划分器，它会产生高质量的划分网格。METIS 是由 Minnesota 大学和 Army HPC 研究中心的 Karypis 与 Kumar 开发的划分不规则图形的软件包。它使用多级方法，该方法将高质量图形的顶点和边缘接合形成粗糙图形，然后将粗糙图形划分，再然后去粗糙化为精细图形。在粗糙化和去粗糙化过程中，算法允许产生高质量的划分。有关 METIS 的详细信息可以参阅相关手册[79]。

边界条件

定义边界条件概述

边界条件包括流动变量和热变量在边界处的值。它是 FLUENT 分析得很关键的一部分，设定边界条件必须小心谨慎。

边界条件的分类：进出口边界条件：压力、速度、质量进口、进风口、进气扇、压力出口、压力远场边界条件、质量出口、通风口、排气扇；壁面、repeating, and pole boundaries: 壁面，对称，周期，轴；内部单元区域：流体、固体(多孔是一种流动区域类型) ；内部表面边界：风扇、散热器、多孔跳跃、壁面、内部。(内部表面边界条件定义在单元表面，这意味着它们没有有限厚度，并提供了流场性质的每一步的变化。这些边界条件用来补充描述排气扇、细孔薄膜以及散热器的物理模型。内部表面区域的内部类型不需要你输入任何东西。)

下面一节将详细介绍上面所叙述边界条件，并详细介绍了它们的设定方法以及设定的具体合适条件。周期性边界条件在本章中介绍，模拟完全发展的周期性流动将在周期性流动和热传导一章中介绍。

使用边界条件面板

边界条件(Figure 1)对于特定边界允许你改变边界条件区域类型，并且打开其他的面板以设定每一区域的边界条件参数

菜单：Define/Boundary Conditions...

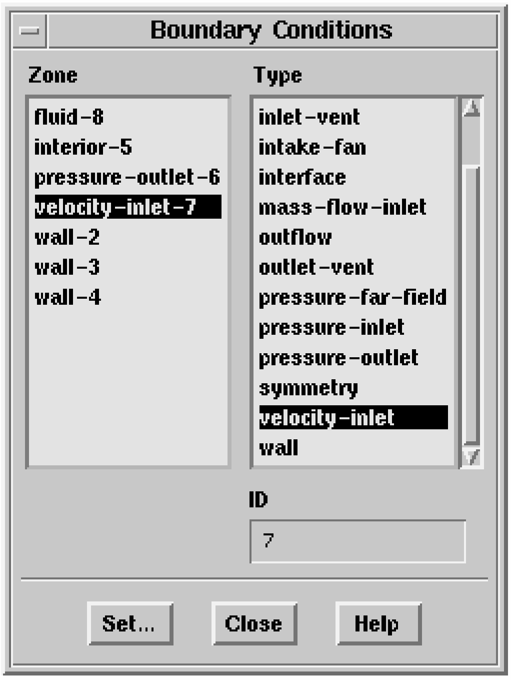


Figure 1: 边界条件面板

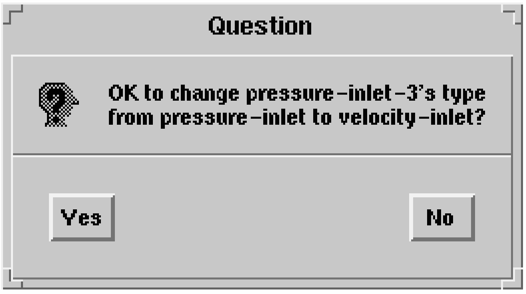
改变边界区域类型

设定任何边界条件之前，必须检查所有边界区域的区域类型，如有必要就作适当的修改。比方说：如果你的网格是压力入口，但是你想要使用速度入口，你就要把压力入口改为速度入口之后再设定。

改变类型的步骤如下：:

1.在区域下拉列表中选定所要修改的区域

2.在类型列表中选择正确的区域类型
3.当问题提示菜单出现时，点击确认



确认改变之后，区域类型将会改变，名字也将自动改变 (如果初始名字时缺省的请参阅边界条件区域名字一节),设定区域边界条件的面板也将自动打开。

！注意：这个方法不能用于改变周期性类型，因为该边界类型已经存在了附加限制。创建边界条件一节解释了如何创建和分开周期性区域。需要注意的是，只能在图一中每一个类别中改变边界类型(注意：双边区域表面是分离的不同单元区域.)

Category	Zone Types
Faces	axis, outflow, mass flow inlet, pressure far-field, pressure inlet, pressure outlet, symmetry, velocity inlet, wall, inlet vent, intake fan, outlet vent, exhaust fan
Double-Sided Faces	fan, interior, porous jump, radiator, wall
Periodic	periodic
Cells	fluid, solid (porous is a type of fluid cell)

Figure 1: 区域类型的分类列表

设定边界条件

在 FLUENT 中，边界条件和区域有关而与个别表面或者单元无关。如果要结合具有相同边界条件的两个或更多区域请参阅合并区域一节。

设定每一特定区域的边界条件，请遵循下面的步骤：

1.在边界条件区域的下拉列表中选择区域。2. 点击 Set...按钮。或者，1.在区域下拉列表中选择区域。

2.在类型列表中点击所要选择的类型。或者在区域列表中双击所需区域.，选择边界条件区域将会打开，并且你可以指定适当的边界条件

在图像显示方面选择边界区域

在边界条件中不论你合适需要选择区域，你都能用鼠标在图形窗口选择适当的区域。如果你是第一次设定问题这一功能尤其有用，如果你有两个或者更多的具有相同类型的区域而且你想要确定区域的标号（也就是画出哪一区域是哪个）这一功能也很有用。要使用该功能请按下述步骤做：

1.用网格显示面板显示网格。2.用鼠标指针（默认是鼠标右键——参阅控制鼠标键函数以改变鼠标键的功能）在图形窗口中点击边界区域。在图形显示中选择的区域将会自动被选入在边界条件面板中的区域列表中，它的名字和编号也会自动在控制窗口中显示

改变边界条件名字

每一边界的名字是它的类型加标号数（比如 pressure-inlet-7）。在某些情况下你可能想要对边界区域分配更多的描述名。如果你有两个压力入口区域，比方说，你可能想重名名它们

为 small-inlet 和 large-inlet。(改变边界的名字不会改变相应的类型)

重名名区域，遵循如下步骤：

1. 在边界条件的区域下拉列表选择所要重名名的区域。
2. 点击 Set...打开所选区域的面板。3.在区域名字中输入新的名字 4.点击 OK 按钮。

注意：如果你指定区域的新名字然后改变它的类型，你所改的名字将会被保留，如果区域名字是类型加标号，名字将会自动改变。

边界条件的非一致输入

每一类型的边界区域的大多数条件定义为轮廓函数而不是常值。你可以使用外部产生的边界轮廓文件的轮廓，或者用自定义函数(UDF)来创建。具体情况清参阅相关内容

流动入口和出口

FLUENT 有很多的边界条件允许流动进入或者流出解域。下面一节描述了每一种边界条件的类型的使用以及所需要的信息，这样就帮助你适当的选择边界条件。下面还提供了湍流参数的入口值的确定方法。

使用流动边界条件

下面对流动边界条件的使用作一概述

对于流动的出入口，FLUENT 提供了十种边界单元类型：速度入口、压力入口、质量入口、压力出口、压力远场、质量出口，进风口，进气扇，出风口以及排气扇。

下面是 FLUENT 中的进出口边界条件选项：

- 速度入口边界条件用于定义流动入口边界的速度和标量
- 压力入口边界条件用来定义流动入口边界的总压和其它标量。
- 质量流动入口边界条件用于可压流规定入口的质量流速。在不可压流中不必指定入口的质量流，因为当密度是常数时，速度入口边界条件就确定了质量流条件。
- 压力出口边界条件用于定义流动出口的静压（在回流中还包括其它的标量）。当出现回流时，使用压力出口边界条件来代替质量出口条件常常有更好的收敛速度。
- 压力远场条件用于模拟无穷远处的自由可压流动，该流动的自由流马赫数以及静态条件已经指定了。这一边界类型只用于可压流。
- 质量出口边界条件用于在解决流动问题之前，所模拟的流动出口的流速和压力的详细情况还未知的情况。在流动出口是完全发展的时候这一条件是适合的，这是因为质量出口边界条件假定出了压力之外的所有流动变量正法向梯度为零。对于可压流计算，这一条件是不适合的。
- 进风口边界条件用于模拟具有指定的损失系数，流动方向以及周围（入口）环境总压和总温的进风口。
- 进气扇边界条件用于模拟外部进气扇，它具有指定的压力跳跃，流动方向以及周围（进口）总压和总温。
- 通风口边界条件用于模拟通风口，它具有指定的损失系数以及周围环境（排放处）的静压和静温。
- 排气扇边界条件用于模拟外部排气扇，它具有指定的压力跳跃以及周围环境（排放处）的静压。

决定湍流参数

在入口、出口或远场边界流入流域的流动，FLUENT 需要指定输运标量的值。本节描述了对于特定模型需要哪些量，并且该如何指定它们。也为确定流入边界值最为合适的方法提供了指导方针。

使用轮廓指定湍流参量

在入口处要准确的描述边界层和完全发展的湍流流动，你应该通过实验数据和经验公式创建边界轮廓文件来完美的设定湍流量。如果你有轮廓的分析描述而不是数据点，你也可以用这个分析描述来创建边界轮廓文件，或者创建用户自定义函数来提供入口边界的信息。一旦你创建了轮廓函数，你就可以使用如下的方法：

- Spalart-Allmaras 模型：在湍流指定方法下拉菜单中指定湍流粘性比，并在在湍流粘性比之后的下拉菜单中选择适当的轮廓名。通过将 m_t/m 和密度与分子粘性的适当结合，FLUENT 为修改后的湍流粘性计算边界值。
- k-e 模型：在湍流指定方法下拉菜单中选择 K 和 Epsilon 并在湍动能（Turb. Kinetic Energy）和湍流扩散速度（Turb. Dissipation Rate）之后的下拉菜单中选择适当的轮廓名。
- 雷诺应力模型：在湍流指定方法下拉菜单中选择 K 和 Epsilon 并在湍动能（Turb. Kinetic Energy）和湍流扩散速度（Turb. Dissipation Rate）之后的下拉菜单中选择适当的轮廓名。在湍流指定方法下拉菜单中选择雷诺应力部分，并在每一个单独的雷诺应力部分之后的下拉菜单中选择适当的轮廓名。

湍流量的统一说明

在某些情况下流动流入开始时，将边界处的所有湍流量指定为统一值是适当的。比如说，在进入管道的流体，远场边界，甚至完全发展的管流中，湍流量的精确轮廓是未知的。

在大多数湍流流动中，湍流的更高层次产生于边界层而不是流动边界进入流域的地方，因此这就导致了计算结果对流入边界值相对来说不敏感。然而必须注意的是要保证边界值不是非物理边界。非物理边界会导致你的解不准确或者不收敛。对于外部流来说这一特点尤其突出，如果自由流的有效粘性系数具有非物理性的大值，边界层就会找不到了。

你可以在使用轮廓指定湍流量一节中描述的湍流指定方法，来输入同一数值取代轮廓。你也可以选择用更为方便的量来指定湍流量，如湍流强度，湍流粘性比，水力直径以及湍流特征尺度，下面将会对这些内容作一详细叙述。

湍流强度 I 定义为相对于平均速度 u_avg 的脉动速度 u^'的均方根。

小于或等于 1%的湍流强度通常被认为低强度湍流，大于 10%被认为是高强度湍流。从外界，测量数据的入口边界，你可以很好的估计湍流强度。例如：如果你模拟风洞试验，自由流的湍流强度通常可以从风洞指标中得到。在现代低湍流风洞中自由流湍流强度通常低到 0.05%。.

对于内部流动，入口的湍流强度完全依赖于上游流动的历史，如果上游流动没有完全发展或者没有被扰动，你就可以使用低湍流强度。如果流动完全发展，湍流强度可能就达到了百分之几。完全发展的管流的核心的湍流强度可以用下面的经验公式计算：

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} \cong 0.16\left(\mathrm{Re}_{D_H}\right)^{-1/8}$$

例如，在雷诺数为 50000 是湍流强度为 4%

湍流尺度 l 是和携带湍流能量的大涡的尺度有关的物理量。在完全发展的管流中，l 被管道的尺寸所限制，因为大涡不能大于管道的尺寸。L 和管的物理尺寸之间的计算关系如下：

$$l = 0.07L$$

其中 L 为管道的相关尺寸。因子 0.07 是基于完全发展湍流流动混合长度的最大值的，对于非圆形截面的管道，你可以用水力学直径取代 L。

如果湍流的产生是由于管道中的障碍物等特征，你最好用该特征长度作为湍流长度 L 而不是用管道尺寸。

注意：公式 $l = 0.07L$ 并不是适用于所有的情况。它只是在大多数情况下得很好的近似。对于特定流动，选择 L 和 l 的原则如下：

- 对于完全发展的内部流动，选择强度和水力学直径指定方法，并在水力学直径流场中指定 L=D_H。
- 对于旋转叶片的下游流动，穿孔圆盘等，选择强度和水力学直径指定方法，并在水力学直径流场中指定流动的特征长度为 L
- 对于壁面限制的流动，入口流动包含了湍流边界层。选择湍流强度和长度尺度方法并使用边界层厚度 d_99 来计算湍流长度尺度 l，在湍流长度尺度流场中输入 l=0.4 d_99 这个值

湍流粘性比 m_t/m 直接与湍流雷诺数成比例(Re_t ?k^2/(e n))。Re_t 在高湍流数的边界层，剪切层和完全发展的管流中是较大的(100 到 1000)。然而，在大多数外流的自由流边界层中 m_t/m 相当的小。湍流参数的典型设定为 1 < m_t/m <10。

要根据湍流粘性比来指定量，你可以选择湍流粘性比（对于 Spalart-Allmaras 模型）或者强度和粘性比（对于 k-e 模型或者 RSM）。

推导湍流量的关系式

要获得更方便的湍流量的输运值，如：I, L,或者 m_t/m，你必须求助于经验公式，下面是 FLUENT 中常用的几个有用的关系式。要获得修改的湍流粘性，它和湍流强度 I 长度尺度 l 有如下关系：

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\frac{3}{2}} u_{avg} I l$$

在 Spalart-Allmaras 模型中，如果你要选择湍流强度和水力学直径来计算 l 可以从前面的公式中获得。

湍动能 k 和湍流强度 I 之间的关系为：

$$k = \frac{3}{2}\left(u_{avg} I\right)^2$$

其中 u_avg 为平均流动速度

除了为 k 和 e 指定具体的值之外，无论你是使用湍流强度和水力学直径，强度和长度尺度或者强度粘性比方法，你都要使用上述公式。

如果你知道湍流长度尺度 l 你可以使用下面的关系式：

$$\varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l}$$

其中 C_μ 是湍流模型中指定的经验常数（近似为 0.09），l 的公式在前面已经讨论了。

除了为 k 和 e 制定具体的值之外，无论你是使用湍流强度和水力学直径还是强度和长度尺度，你都要使用上述公式。
E 的值也可以用下式计算，它与湍流粘性比 m_t/m 以及 k 有关：

$$\varepsilon = \rho C_\mu \frac{k^2}{\mu}\left(\frac{\mu_t}{\mu}\right)^{-1}$$

其中 C_μ 是湍流模型中指定的经验常数（近似为 0.09）。

除了为 k 和 e 制定具体的值之外，无论你是使用湍流强度和水力学直径还是强度和长度尺度，你都要使用上述公式。

如果你是在模拟风洞条件，在风洞中模型被安装在网格和/或金属网格屏下游的测试段，你可以用下面的公式：

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta k U_\infty}{L_\infty}$$

其中，Δk 是你希望的在穿过流场之后 k 的衰减(比方说 k 入口值的 10%), U_∞ 自由流的速度

L_∞ 是流域内自由流的流向长度 Equation 9 是在高雷诺数各向同性湍流中观察到的幂率衰减的线性近似。它是基于衰减湍流中 k 的精确方程 U ?k/?x = - e.

如果你用这种方法估计 e，你也要用方程 7 检查结果的湍流粘性比 m_t/m，以保证它不是太大。

虽然这不是 FLUENT 内部使用的方法，但是你可以用它来推导 e 的常数自由流值，然后你可以用湍流指定方法下拉菜单中选择 K 和 Epsilon 直接指定。在这种情况下，你需要使用方程 3 从 I 来计算 k。

当使用 RSM 时，如果你不在雷诺应力指定方法的下拉列表中使用雷诺应力选项，明显的制定入口处的雷诺应力值，它们就会近似的由 k 的指定值来决定。湍流假定为各向同性，保证

$$\overline{u_i u_j} = 0$$

以及

$$\overline{u_\alpha u_\alpha} = \frac{2}{3}k$$

(下标 a 不求和).
如果你在雷诺应力指定方法下拉列表中选择 K 或者湍流强度，FLUENT 就会使用这种方法。

对大涡模拟（LES）指定入口湍流

大涡模拟模型一节中所描述的 LES 速度入口中指定的的湍流强度值，被用于随机扰动入口处速度场的瞬时速度。它并不指定被模拟的湍流量。正如大涡模拟模型中介绍的边界条件中所描述的，通过叠加每个速度分量的随机扰动来计算流动入口边界处的随机成分.

压力入口边界条件

压力入口边界条件用于定义流动入口的压力以及其它标量属性。它即可以适用于可压流，也可以用于不可压流。压力入口边界条件可用于压力已知但是流动速度和/或速率未知的情况。这一情况可用于很多实际问题，比如浮力驱动的流动。压力入口边界条件也可用来定义外部或无约束流的自由边界。对于流动边界条件的概述，请参阅流动入口和出口一节。

压力入口边界条件的输入

综述

对于压力入口边界条件你需要输入如下信息

- 驻点总压
- 驻点总温
- 流动方向
- 静压
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 辐射参数(对于使用 P-1 模型、DTRM 模型或者 DO 模型的计算)
- 化学组分质量百分比(对于组分计算)
- 混合分数和变化(对于 PDF 燃烧计算)
- 程序变量(对于预混和燃烧计算)
- 离散相边界条件(对于离散相的计算)
- 次要相的体积分数(对于多相计算)

所有的值都在压力入口面板中输入(Figure 1)，该面板是从边界条件打开的。

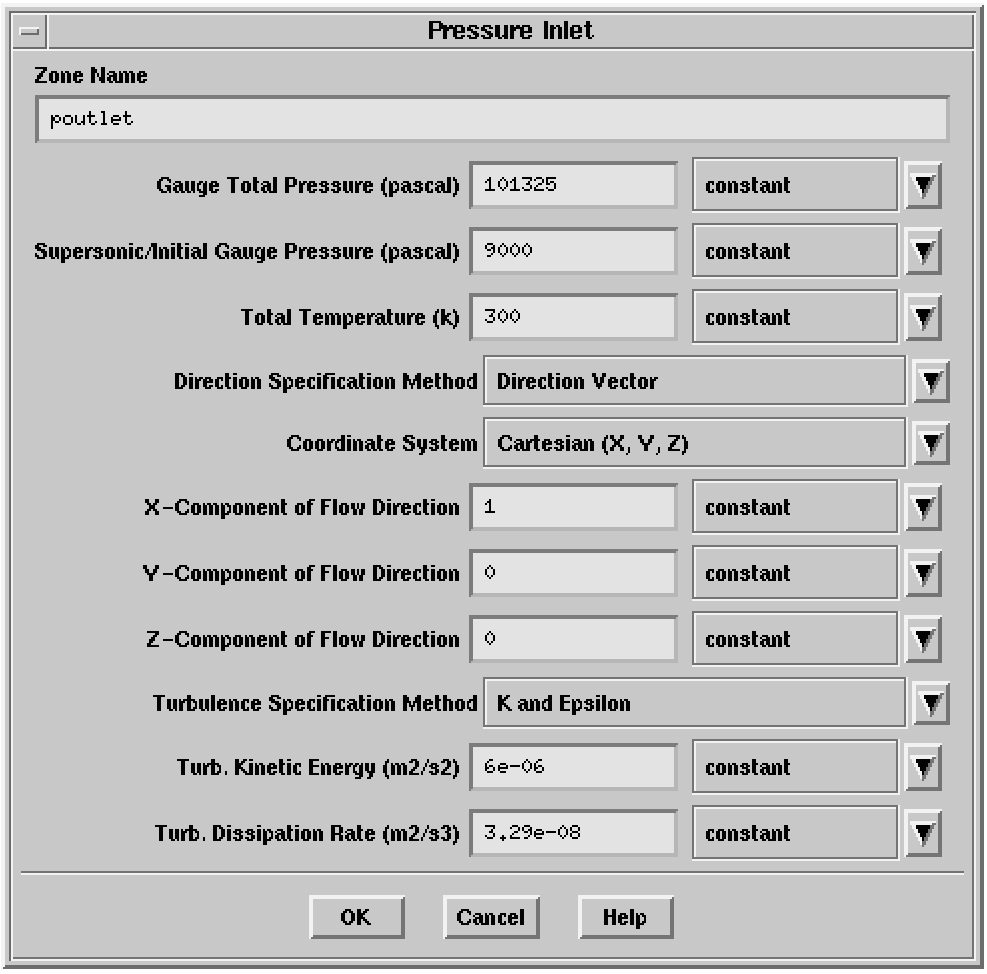


Figure 1: 压力入口面板

压力输入和静压头

压力场(p_s^')和压力输入(p_s^' or p_0^')包括静压头 r_0 g x。也就是 FLUENT 以下式定义的压力：

$$p_s' = \rho_0 g x + p_s$$

或者

$$\frac{\partial p_s'}{\partial x} = \rho_0 g + \frac{\partial p_s}{x}$$

这一定义允许静压头放进体积力项(r - r_0)g 中考虑，而且当密度一致时，从压力计算中排除了。因此你的压力输入不因该考虑静压的微分，压力(p^'_s)的报告也不会显示静压的任何影响。有关浮力驱动流动的内容请参阅浮力驱动流动和自然对流的信息

定义总压和总温

在压力入口面板中的 Gauge Total Pressure field 输入总压值。总温会在 Total Temperature field 中设定。记住，总压值是在操作条件面板中定义的与操作压力有关的的总压值。不可压流体的总压定义为：

$$p_0 = p_s + \rho |v|^2$$

对于可压流体为：

$$p_0 = p_s\left[1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right]^{\gamma/(\gamma-1)}$$

其中：p_0　=总压

p_s　=　静压

M　=　马赫数

c　=　比热比(c_p/c_v)

如果模拟轴对称涡流，方程 1 中的 v 包括了旋转分量。如果相邻区域是移动的（即：如果使用旋转参考坐标系，多重参考坐标系，混合平面或者滑移网格），而且你是使用分离解算器。那么方程 1 中的速度（或者方程 3 中的马赫数）将是绝对的，或者相对与网格速度。这依赖于解算器面板中绝对速度公式是否激活。对于耦合解算器，方程 1 中的速度（或者方程 3 中的马赫数）通常是在绝对坐标系下的速度。

定义流动方向

你可以在压力入口明确的定义流动的方向，或者定义流动垂直于边界。如果你选择指定方向矢量，你既可以设定笛卡尔坐标 x, y,和 z 的分量，也可以设(圆柱坐标的)半径，切线和轴向分量。对于使用分离解算器计算移动区域问题，流动方向将是绝对速度或者相对于网格相对速度，这取决于解算器面板中的绝对速度公式是否被激活。对于耦合解算器，流动方向通常是绝对坐标系中的。

定义流动方向的步骤如下，总结请参考 Figure 1。

1. 在方向指定下拉菜单中选择指定流动方向的方法，或者是方向矢量或者是垂直于边界。
2. 如果你在第一步中选择垂直于边界，并且是在模拟轴对称涡流，请输入流动适当的切向速度，如果不是模拟涡流就不需要其它的附加输入了。
3. 如果第一步中你选择指定方向矢量，并且你的几何外形是 3 维的，你就需要选择定义矢量分量的坐标系统。在坐标系下拉菜单中选择笛卡尔(X, Y, Z)坐标，柱坐标（半径，切线和轴），或者局部柱坐标。

- 笛卡尔坐标系是基于几何图形所使用的笛卡尔坐标系。
- 柱坐标在下面的坐标系统的基础上使用轴、角度和切线三个分量。
- 对于包含一个单独的单元区域时，坐标系由旋转轴和在流体面板中原来的指定来定义。
- 对于包含多重区域的问题（比如多重参考坐标或滑动网格），坐标系由流体（固体）面板中为临近入口的流体（固体）区域的旋转轴来定义。

对于上述所有柱坐标的定义，正径向速度指向旋转轴的外向。正轴向速度和旋转轴矢量的方向相同，正切向方向用右手定则来判断。参阅下图一目了然。

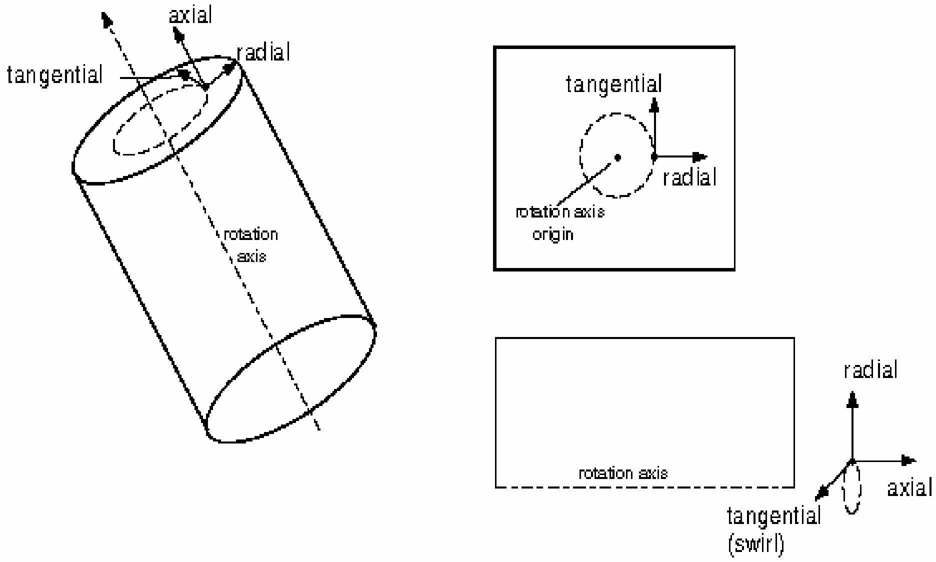


Figure 1: 在二维、三维和轴对称区域的柱坐标速度分量

当地柱坐标系统允许你对特定的入口定义坐标系，在压力入口面板中你就可以定义该坐标系统。如果你对于不同的旋转轴有几个入口，那么当地坐标系会很有用的。

4. 如果你在第一步中指定方向矢量，用如下的方法定义矢量分量：

- 如果是二维非对称图形或者你在第三步中选择矢量分量，请输入适当的 X, Y, 和(in 3D) Z 分量。
- 如果是二维轴对称图形或者第三部分选择了柱坐标，请输入适当的半径，角度以及切线方向的分量。
- 如果使用当地柱坐标系，请输入适当的半径，角度以及切线方向的分量，并指定轴向的 X, Y,和 Z 向分量，以及坐标起点的坐标。

图一就是各个坐标系统的矢量分量。

定义静压

如果入口流动是超声速的，或者你打算用压力入口边界条件来对解进行初始化，那么你必须指定静压(termed the Supersonic/Initial Gauge Pressure)。

需要记住的是这个静压和你在操作条件面板中的操作压力是相关的。请参阅有关于压力输入和静压头相关输入的解释。

只要流动是压声速的，FLUENT 会忽略 Supersonic/Initial Gauge Pressure，它是由指定的驻点值来计算的。如果你打算使用压力入口边界条件来初始化解域，Supersonic/Initial Gauge Pressure 是与计算初始值的指定驻点压力相联系的，计算初始值的方法有各向同性关系式（对于可压流）或者贝努力方程（对于不可压流）。因此，对于压声速入口，它是在关于入口马赫数（可压流）或者入口速度（不可压流）合理的估计之上设定的。

定义湍流参数

对于湍流计算，有几种方法来定义湍流参数。至于哪种方法合适请参阅决定湍流参数一节。湍流模型是在“湍流模型”一章中介绍

定义辐射参数

如果你打算使用 P-1 辐射模型、DTRM 或者 DO 模型，你就需要设定内部发散率以及（可选）黑体温度。详情请参阅设定边界条件一节(Rosseland 不需要任何边界条件的输入)。

定义组分质量百分比

如果你是用有限速度模型来模拟组分输运，你就需要设定组分质量百分比。详情请参阅组分边界条件的定义。

定义 PDF/混合分数参数

如果你用 PDF 模型模拟燃烧，你就需要设定平均混合分数以及混合分数变化（如果你是用两个混合分数就还包括二级平均混合分数和二级混合分数变化）。具体情况如第三步定义边界条件所述。

定义预混和燃烧边界条件

如果使用与混合燃烧模型，你就需要设定发展变量。请见发展变量的边界条件设定。

定义离散相边界条件

如果你是在模拟粒子的离散相，你就可以在压力入口设定粒子轨道详情请参阅离散向模型的边界设定。

定义多相边界条件

对于多相流如果使用 VOF，cavitation 或者代数滑移混合模型，你就需要指定所有二级相的体积分数。详情请参阅 VOF 模型、cavitation 模型或者代数滑移混合模型的边界设定。

压力入口边界条件的默认设定

压力入口边界条件的默认设定如下（国际标准单位）：

Gauge Total Pressure	0
Supersonic/Initial Gauge Pressure	0
Total Temperature	300
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1

压力入口边界处的计算程序

FLUENT 压力入口边界条件的处理可以描述为从驻点条件到入口条件的非自由化的过渡。对于不可压流是通过入口边界贝努力方程的应用来完成的。对于可压流，使用的是理想气体的各向同性流动关系式。

压力入口边界处的不可压流动计算

流动进入压力入口边界时，FLUENT 使用边界条件压力，该压力是作为入口平面 p_0 的总压输入的。在不可压流动中，入口总压，静压和速度之间有如下关系：$p_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho v^2$。通过你在出口分配的速度大小和流动方向可以计算出速度的各个分量。入口质量流速以及动量、能量和组分的流量可以作为计算程序在速度入口边界的大纲用来计算流动

对于不可压流，入口平面的速度既可以是常数也可以是温度或者质量分数的函数。其中质量分数是你输入作为入口条件的值。在通过压力出口流出的流动，用指定的总压作为静压来使用。对于不可压流动来说，总温和静温相等。

压力入口边界的可压流动计算

对于可压流，应用理想气体的各向同性关系可以在压力入口将总压，静压和速度联系起来。在入口处输入总压，在临近流体单元中输入静压，有关系式如下：

$$\frac{p_0' + p_{0p}}{p_s' + p_{0p}} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right]^{\gamma/(\gamma-1)}$$

其中马赫数定义为：

$$M = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{\gamma R T_s}}$$

马赫数的定义就不详述了。需要注意的是上面的方程中出现了操作压力 p_op 这是因为边界条件的输入是和操作压力有关的压力。给定 p_0^'和 p_s^'上面的方程就可以用于计算入口平面流体的速度范围。入口处的各个速度分量用方向矢量来计算。对于可压流，入口平面的密度由理想气体定律来计算：$\rho = \left(p_s' + p_{0p}\right)/RT_s$。

R 由压力入口边界条件定义的组分质量百分比来计算。入口静温和总温的关系由下式计算：$\frac{T_0}{T_s} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2$。

速度入口边界条件

速度入口边界条件用于定义流动速度以及流动入口的流动属性相关标量。在这个边界条件中，流动总的（驻点）的属性不是固定的，所以无论什么时候提供流动速度描述，它们都会增加。

这一边界条件适用于不可压流，如果用于可压流它会导致非物理结果，这是因为它允许驻点条件浮动。你也应该小心不要让速度入口靠近固体妨碍物，因为这会导致流动入口驻点

属性具有太高的非一致性。

对于特定的例子，FLUENT 可能会使用速度入口在流动出口处定义流动速度（在这种情况下不使用标量输入）。在这种情况下，必须保证区域内的所有流动性。对于流动的概述请参阅流动入口和出口。

速度入口边界条件的输入

概述

速度入口边界条件需要输入下列信息

- 速度大小与方向或者速度分量。
- 旋转速度（对于具有二维轴对称问题的涡流）。
- 温度（用于能量计算）。
- Outflow gauge pressure (for calculations with the coupled solvers)
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 辐射参数(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 化学组分质量百分数（对于组分计算）。
- 混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）。
- 发展变量（对于预混和燃烧计算）。
- 离散相边界条件（对于离散相计算）
- 二级相的体积分数(对于多相流计算)

上面的所有值都有速度面板输入，它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节）。

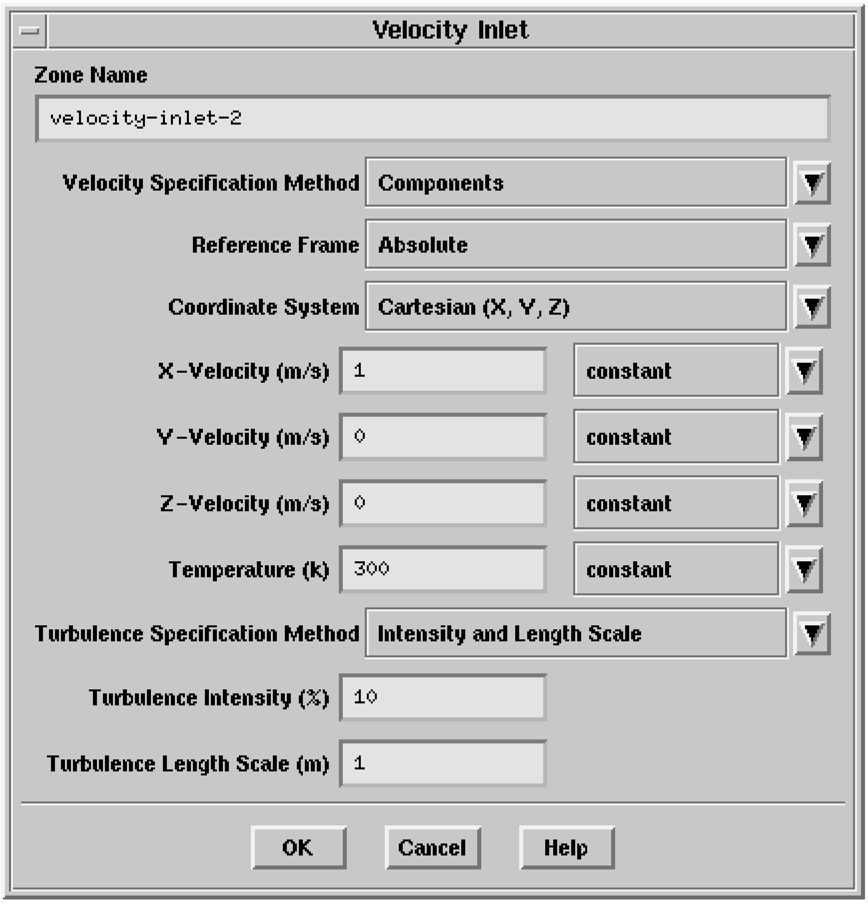


Figure 1: 速度入口面板

定义速度

你可以通过定义来确定入口速度。如果临近速度入口的单元区域是移动的（也就是说你使用旋转参考坐标系，多重坐标系或者滑动网格），你也可以指定相对速度和绝对速度。对于 FLUENT 中的涡流轴对称问题，你还要指定涡流速度。

定义流入速度的程序如下：

1. 选择指定流动方向的方法：在速度指定方法下拉菜单中选择速度大小和方向、速度分量或者垂直于边界的速度大小。
2. 如果临近速度入口的单元区域是移动的，你可以指定相对或绝对速度。相对于临近单元区域或者参考坐标系下拉列表的绝对速度。如果临近单元区域是固定的，相对速度和绝对速度是相等的，这个时候不用察看下拉列表。
3. 如果你想要设定速度的大小和方向或者速度分量，而且你的几何图形是三维的，下一步你就要选择定义矢量和速度分量的坐标系。坐标系就是前面所述的三种。
4. 设定适当的速度参数，下面将会介绍每一个指定方法。

如果第一步中选择的是速度的大小和方向，你需要在流入边界条件中输入速度矢量的大小以及方向。

- 如果是二维非轴对称问题，或者你在第三步中选择笛卡尔坐标系，你需要定义流动 X, Y, 和(在三维问题中) Z 三个分量的大小。
- 如果是二维轴对称问题,，或者第三步中使用柱坐标系，请输入流动方向的径向、轴向和切向的三个分量值。
- 如果你在第三步中选择当地柱坐标系，请输入流动方向的径向、轴向和切向的三个分量值。并指定轴向的 X, Y, 和 Z-分量以及坐标轴起点的 X, Y, 和 Z-坐标的值。

定义流动方向的 Figure 1 表明这些不同坐标系矢量分量。

如果你在定义速度的第一步中选择速度大小以及垂直的边界，你需要在流入边界处输入速度矢量的大小。如果你模拟二维轴对称涡流，你也要输入流向的切向分量。如果你在定义速度的第一步中选择速度分量，你需要在流入边界中输入速度矢量的分量。

- 如果是二维非轴对称问题，或者你在第三步中选择笛卡尔坐标系，你需要定义流动 X, Y, 和(在三维问题中) Z 三个分量的大小。
- 如果是模拟涡流的二维轴对称问题，你需要在速度设定中设定轴向、径向和旋转速度，。
- 如果是第三步中使用柱坐标系，请输入流动方向的径向、轴向和切向的三个分量值，以及（可选）旋转角速度。
- 如果你在第三步中选择当地柱坐标系，请输入流动方向的径向、轴向和切向的三个分量值。并指定轴向的 X, Y, 和 Z-分量以及坐标轴起点的 X, Y, 和 Z-坐标的值。

记住速度的正负分量和坐标方向的正负是相同的。柱坐标系下的速度的正负也是一样。如果你在第一步中定义的是速度分量，并在模拟轴对称涡流，你可以指定除了涡流速度之外的入口涡流角速度 W。相似地，如果你在第三步中使用柱坐标或者当地柱坐标系，你可以指定除切向速度之外的入口角速度 W。

如果你指定 W, v_q 作为每个单元的 W r，其中 r 从起点到单元的距离。如果你指定涡流速度和涡流角速度或者切向速度和角速度，FLUENT 会将 v_q 和 W r 加起来获取每个单元的旋转速度或者切向速度。

定义温度

在解能量方程时，你需要在温度场中的速度入口边界设定流动的静温。

定义流出标准压力

如果你是用一种耦合解算器，你可以为速度入口边界指定流出标准压力。如果在流动要在任何表面边界处流出区域，表面会被处理为压力出口，该压力出口为流出标准压力场中规定的压力。(注意：这一影响和 RAMPANT 中得到的速度远场边界相似。

定义湍流参数

对于湍流计算，有几种定义湍流参数的方法。至于选取哪种方法以及相关的输入值请参阅确定湍流参数一节。湍流模型的相关内容请参阅湍流模型一章。

定义辐射参数

如果你打算使用 P-1 辐射模型、DTRM 或者 DO 模型，你就需要设定内部发散率以及（可选）黑体温度。详情请参阅设定边界条件一节(Rosseland 不需要任何边界条件的输入)。

定义组分质量百分比

如果你是用有限速度模型来模拟组分输运，你就需要设定组分质量百分比。详情请参阅组分边界条件的定义。

定义 PDF/混合分数参数

如果你用 PDF 模型模拟燃烧，你就需要设定平均混合分数以及混合分数变化（如果你是用两个混合分数就还包括二级平均混合分数和二级混合分数变化）。具体情况如第三步定义边界条件所述。

定义预混和燃烧边界条件

如果使用与混合燃烧模型，你就需要设定发展变量。请见发展变量的边界条件设定。

定义离散相边界条件

如果你是在模拟粒子的离散相，你就可以在速度入口设定粒子轨道详情请参阅离散向模型的边界设定。

定义多相边界条件

对于多相流如果使用 VOF，cavitation 或者代数滑移混合模型，你就需要指定所有二级相的体积分数。详情请参阅 VOF 模型、cavitation 模型或者代数滑移混合模型的边界设定。

速度入口边界条件的默认设定

速度入口边界条件的默认设定（国际单位）：

Temperature 300
Velocity Magnitude 0
X-Component of Flow Direction 1
Y-Component of Flow Direction 0
Z-Component of Flow Direction 0
X-Velocity 0
Y-Velocity 0
Z-Velocity 0
Turb. Kinetic Energy 1
Turb. Dissipation Rate 1
Outflow Gauge Pressure 0

速度入口边界的计算程序

FLUENT 使用速度入口的边界条件输入计算流入流场的质量流以及入口的动量、能量和组分流量。本节介绍了通过速度入口边界条件流入流场的算例，以及通过速度入口边界条件流出流场的算例。

流动入口的速度入口条件处理

使用速度入口边界条件定义流入物理区域的模型，FLUENT 既使用速度分量也使用标量。这些标量定义为边界条件来计算入口质量流速，动量流量以及能量和化学组分的流量。

邻近速度入口边界流体单元的质量流速由下式计算：

$$\dot{m} = \int \rho v \cdot dA$$

注意只有垂直于控制体表面的流动分量才对流入质量流速有贡献。

流动出口的速度入口条件处理

有时速度入口边界条件用于流出物理区域的流动。比如通过某一流域出口的流速已知，或者被强加在模型上，就需要用这一方法。

注意：这种方法在使用之前必须保证流域内的全部连续性。

在分离解算器中，当流动通过速度入口边界条件流出流场时，FLUENT 在边界条件中使用速度垂直于出口区域的速度分量。它不使用任何你所输入的其它的边界条件。除了垂直速度分量之外的所有流动条件，都被假定为逆流的单元。

在耦合解算器中，如果流动流出边界处的任何表面的区域，那一表面就会被看成压力出口，这一压力为 Outflow Gauge Pressure field 中所规定的压力。

密度计算

入口平面的密度既可以是常数也可以是温度、压力和/或组分质量百分数（你在入口条件中输入的）的函数。

质量入口边界条件

该边界条件用于规定入口的质量流量。为了实现规定的质量流量中需要的速度，就要调节当地入口总压。这和压力入口边界条件是不同的，在压力入口边界条件中，规定的是流入驻点的属性，质量流量的变化依赖于内部解。

当匹配规定的质量和能量流速而不是匹配流入的总压时，通常就会使用质量入口边界条件。比如：一个小的冷却喷流流入主流场并和主流场混合，此时，主流的流速主要的由（不同的）压力入口/出口边界条件对控制。

调节入口总压可能会导致节的收敛，所以如果压力入口边界条件和质量入口条件都可以接受，你应该选择压力入口边界条件。
在不可压流中不必使用质量入口边界条件，因为密度是常数，速度入口边界条件就已经确定了质量流。关于流动边界条件的概述请参阅流动入口和出口一节。

质量入口边界条件的输入

概述
质量入口边界条件需要输入：

- 质量流速和质量流量
- 总温（驻点温度）
- 静压
- 流动方向
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 辐射参数(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 化学组分质量百分数（对于组分计算）。
- 混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）。
- 发展变量（对于预混和燃烧计算）。
- 离散相边界条件（对于离散相计算）

上面的所有值都由质量入口面板输入，它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节）。

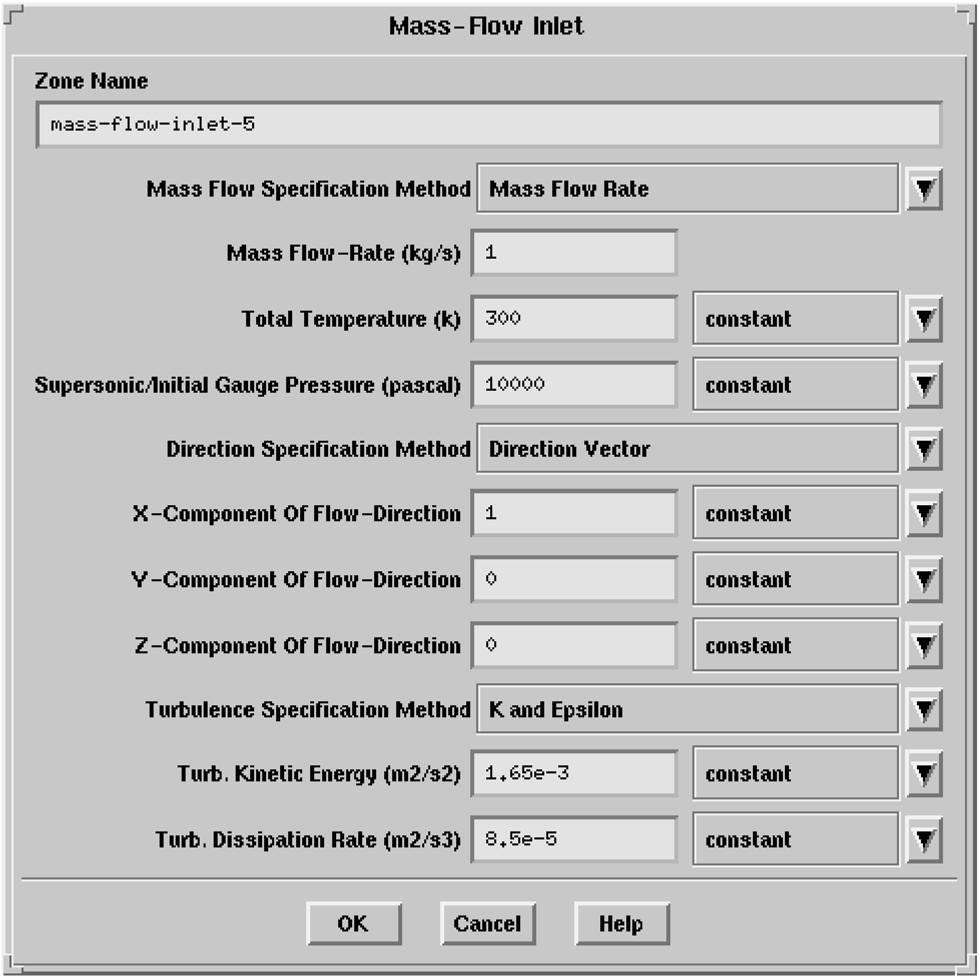


Figure 1:质量流动入口面板

定义质量流速度和流量

你可以输入通过质量入口的质量流速，然后 FLUENT 将这个值转换为质量流量，或者直接指定质量流量。如果你设定规定的质量流速，它将在内部转换为区域上的规定的统一质量流量，这一区域由流速划分。你也可以使用边界轮廓或者自定义函数来定义质量流量（不是质量流速）。

质量流速或者流量的输入如下：

1. 选择质量流速的方法：质量流速或者质量流量
2. 如果是质量流速（默认），在质量流速框中输入规定的质量流速。

注意：对于轴对称问题，这一质量流速是通过完整区域(2p-radian)而不是 1-radian 部分的流速。

如果选择质量流量。请在 Mass Flux 框中输入质量流量。

注意：对于轴对称问题，这一质量流量是通过完整区域(2p-radian)而不是 1-radian 部分的流量。

定义总温

在质量流入口面板中的流入流体的总温框中输入总温（驻点温度）值。

定义静压

如果入口流动是超声速的，或者你打算用压力入口边界条件来对解进行初始化，那么你必须指定静压(termed the Supersonic/Initial Gauge Pressure)。

只要流动是压声速的，FLUENT 会忽略 Supersonic/Initial Gauge Pressure，它是由指定的驻点值来计算的。如果你打算使用压力入口边界条件来初始化解域，Supersonic/Initial Gauge Pressure 是与计算初始值的指定驻点压力相联系的，计算初始值的方法有各向同性关系式（对于可压流）或者贝努力方程（对于不可压流）。因此，对于压声速入口，它是在关于入口马赫数（可压流）或者入口速度（不可压流）合理的估计之上设定的。

需要记住的是这个静压和你在操作条件面板中的操作压力是相关的。请参阅有关于压力输入和静压头相关输入的解释。

定义流动方向

你可以在压力入口明确的定义流动的方向，或者定义流动垂直于边界。对于使用分离解算器计算移动区域问题，流动方向将是绝对速度或者相对于网格相对速度，这取决于解算器面板中的绝对速度公式是否被激活。对于耦合解算器，流动方向通常是绝对坐标系中的。

定义流动方向的步骤如下，总结请参考概述中的 Figure 1。

1. 在方向指定下拉菜单中选择指定流动方向的方法，或者是方向矢量或者是垂直于边界。
2. 如果你在第一步中选择垂直于边界，并且是在模拟轴对称涡流，请输入流动适当的切向速度，如果你选择垂直于边界并且你的流动是二维或者三维轴对称涡流，那就不需要流动方向上的其它的附加输入了。
3. 如果第一步中你选择指定方向矢量，并且你的几何外形是 3 维的，你就需要选择定义矢量分量的坐标系统。在坐标系下拉菜单中选择笛卡尔(X, Y, Z)坐标，柱坐标（半径，切线和轴），或者局部柱坐标。

- 如果是二维非轴对称问题或者三维问题，你需要定义流动 X, Y, 和(在三维问题中) Z 三个分量的大小。
- 如果是二维轴对称问题,，请输入流动方向的径向、轴向和切向的三个分量值。

定义湍流参数

对于湍流计算，有几种定义湍流参数的方法。至于选取哪种方法以及相关的输入值请参阅确定湍流参数一节。湍流模型的相关内容请参阅湍流模型一章。

定义辐射参数

如果你打算使用 P-1 辐射模型、DTRM 或者 DO 模型，你就需要设定内部发散率以及（可选）黑体温度。详情请参阅设定边界条件一节(Rosseland 不需要任何边界条件的输入)。

定义组分质量百分比

如果你是用有限速度模型来模拟组分输运，你就需要设定组分质量百分比。详情请参阅组分边界条件的定义。

定义 PDF/混合分数参数

如果你用 PDF 模型模拟燃烧，你就需要设定平均混合分数以及混合分数变化（如果你是用两个混合分数就还包括二级平均混合分数和二级混合分数变化）。具体情况如第三步定义边界条件所述。

定义预混和燃烧边界条件

如果使用与混合燃烧模型，你就需要设定发展变量。请见发展变量的边界条件设定。

定义离散相边界条件

如果你是在模拟粒子的离散相，你就可以在速度入口设定粒子轨道详情请参阅离散向模型的边界设定。

质量流入口边界的默认设定

质量入口边界条件的默认设定（国际标准单位）为：

Mass Flow-Rate 1
Total Temperature 300
Supersonic/Initial Gauge Pressure 0
X-Component of Flow Direction 1
Y-Component of Flow Direction 0
Z-Component of Flow Direction 0
Turb. Kinetic Energy 1
Turb. Dissipation Rate 1

质量流入口边界的计算程序

对入口区域使用质量入口边界条件，该区域的每一个表面的速度被计算出来，并且这一速度用于计算流入区域的相关解变量的流量。对于每一步迭代，调节计算速度以便于保证正确的质量流的数值。

你需要使用质量流速、流动方向、静压以及总温来计算这个速度。
有两种指定质量流速的方法。第一种方法是指定入口的总质量流速 m(dot)。第二种方法是指定质量流量 r v (每个单位面积的质量流速)。如果指定总质量流速，FLUENT 会在内部通过将总流量除以垂直于流向区域的总入口面积得到统一质量流量：

$$\rho v = \frac{\dot{m}}{A}$$

如果使用直接质量流量指定选项，可以使用轮廓文件或者自定义函数来指定边界处的各种质量流量。
一旦在给定表面的 r v 值确定了，就必须确定表面的密度值 r，以找到垂直速度 v。密度获取的方法依赖于所模拟的是不是理想气体。下面检查了各种情况：

理想气体的质量流边界的流动计算

如果是理想气体，要用下式计算密度：

$$p = \rho RT$$

如果入口是超音速，所使用的静压是设为边界条件静压值。如果是亚音速静压是从入口表面单元内部推导出来的。
入口的静温是从总焓推出的，总焓是从边界条件所设的总温推出的。
入口的密度是从理想气体定律，使用静压和静温推导出来的。

不可压流动的质量流边界的流动计算
如果是模拟非理想气体或者液体，静温和总温相同。入口处的密度很容易从温度函数和（可选）组分质量百分比计算出来的。速度用质量入口边界的计算程序中的方程计算出。

质量流边界的流量计算
要计算所有变量在入口处的流量，流速 v 和方程中变量的入口值一起使用。例如，质量流量为 r v，湍流动能的流量为 r k v。这些流量用于边界条件来计算解过程的守恒方程。

进气口边界条件

进气口边界条件用于模拟具有指定损失系数、流动方向以及环境（入口）压力和温度的进气口。

进气口边界的输入
进气口边界需要输入：

- 总压即驻点压力
- 总温即驻点温度。
- 流动方向
- 静压
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 辐射参数(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 化学组分质量百分数（对于组分计算）。
- 混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）。
- 发展变量（对于预混和燃烧计算）。
- 离散相边界条件（对于离散相计算）
- 二级相的体积分数(对于多相流计算)
- 损失系数

上面的所有值都由进气口面板输入，它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节）。

上面的前十一项的设定和压力入口边界的设定一样。下面介绍一下损失系数的设定：

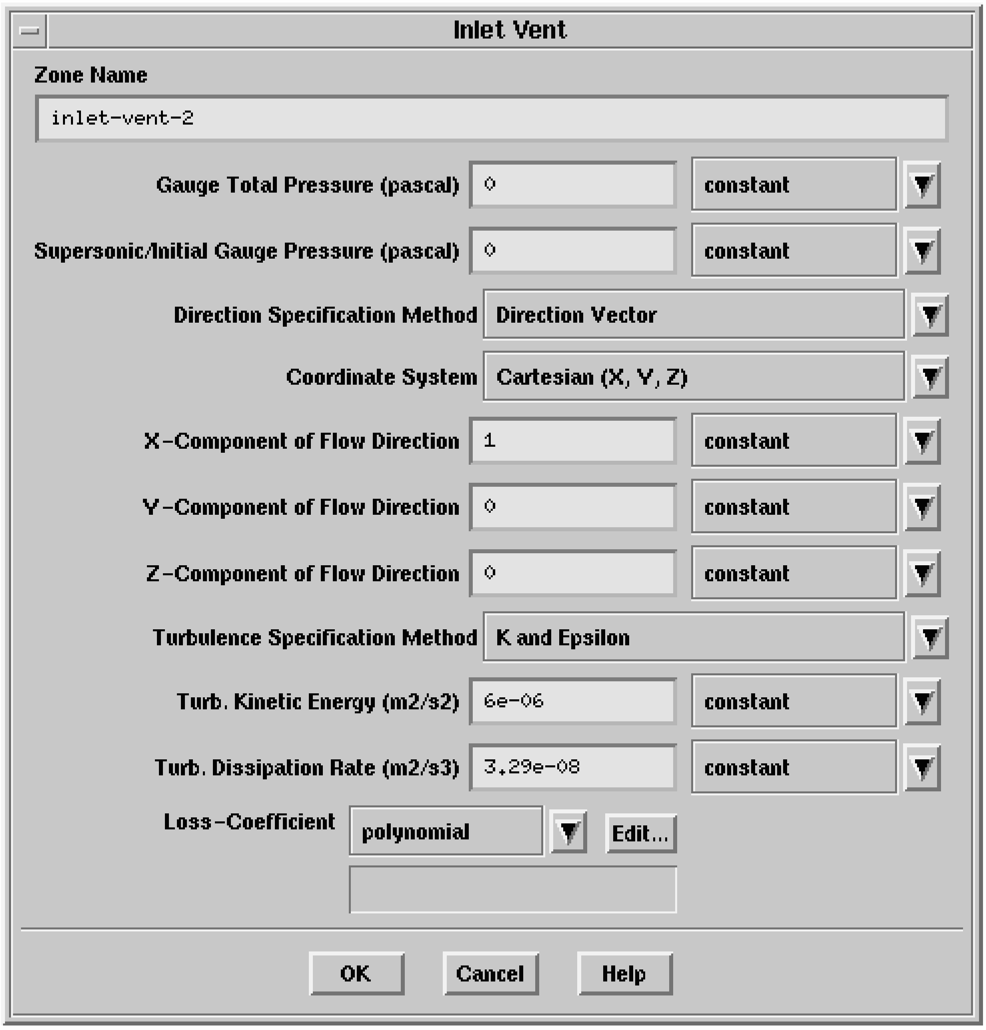


Figure 1: 进气口面板

指定损失系数

FLUENT 中的进气口模型，进气口假定为无限薄，通过进气口的压降假定和流体的动压成比例，并以经验公式确定你所应用的损失系数。也就是说压降 D p 和通过进气口速度的垂直分量的关系为：

$$\Delta p = k_L \frac{1}{2} \rho v^2$$

其中 r 是流体密度，k_L 为无量纲的损失系数。

注意：D p 是流向压降，因此即使是在回流中，进气口都会出现阻力。

你可以定义通过进气口的损失系数为常量、多项式、分段线性函数或者垂向速度的分段多项式函数。定义这些函数的面板和定义温度相关属性的面板相同，详情请参阅使用温度相关函数定义属性一节。

进气扇边界条件

进气扇边界条件用于定义具有特定压力跳跃、流动方向以及环境（进气口）压力和温度的外部进气扇流动。

进气扇边界的输入
进气扇边界需要输入：

- 总压即驻点压力
- 总温即驻点温度。
- 流动方向
- 静压
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 辐射参数(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 化学组分质量百分数（对于组分计算）。
- 混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）。
- 发展变量（对于预混和燃烧计算）。
- 离散相边界条件（对于离散相计算）
- 二级相的体积分数(对于多相流计算)
- 压力跳跃

上面的所有值都由进气扇面板输入，它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节）。
上面的前十一项的设定和压力入口边界的设定一样。下面介绍一下压力跳跃的设定：

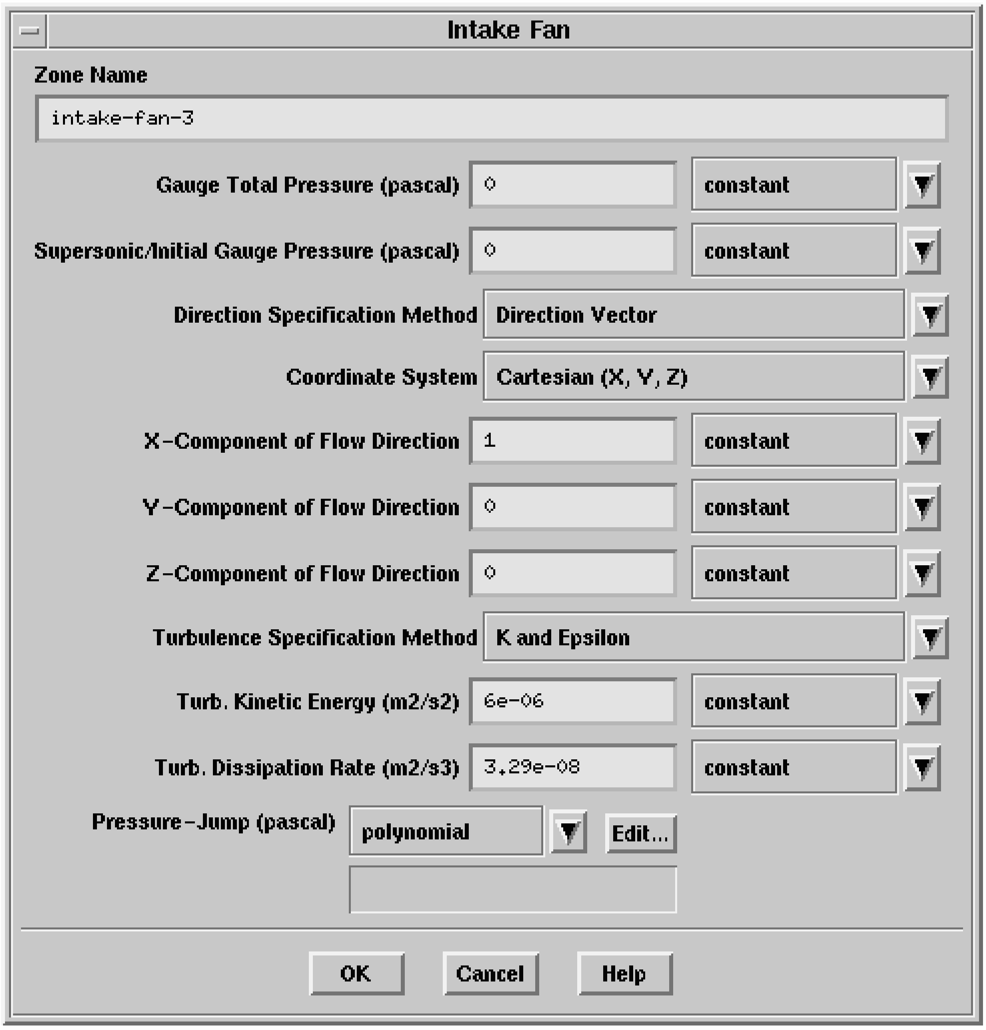


Figure 1: 进气扇面板

指定压力跳跃

所有的进气扇都被假定为无限薄，通过它的非连续压升被指定为通过进气扇速度的函数。在倒流的算例中，进气扇被看成类似于具有统一的损失系数的出气口。

你可以定义通过进气扇的压力跳跃为常量、多项式、分段线性函数或者垂向速度的分段多项式函数。定义这些函数的面板和定义温度相关属性的面板相同，详情请参阅使用温度相关函数定义属性一节。

压力出口边界条件

压力出口边界条件需要在出口边界处指定静（gauge）压。静压值的指定只用于压声速流动。如果当地流动变为超声速，就不再使用指定压力了，此时压力要从内部流动中推断。所有其它的流动属性都从内部推出。

在解算过程中，如果压力出口边界处的流动是反向的，回流条件也需要指定。如果对于回流问题你指定了比较符合实际的值，收敛性困难就会被减到最小。

FLUENT 还提供了使用辐射平衡出口边界条件，详情请参阅定义静压一节。
关于流动边界的概述请参阅流动入口和出口一节。

压力出口边界的输入

概述
压力出口边界条件需要输入：

- 静压
- 回流条件
- 总温即驻点温度（用于能量计算）。
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 化学组分质量百分数（对于组分计算）。
- 混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）。
- 发展变量（对于预混和燃烧计算）。
- 二级相的体积分数(对于多相流计算)
- 辐射参数(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 离散相边界条件（对于离散相计算）

上面的所有值都由压力出口面板输入，它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节）。

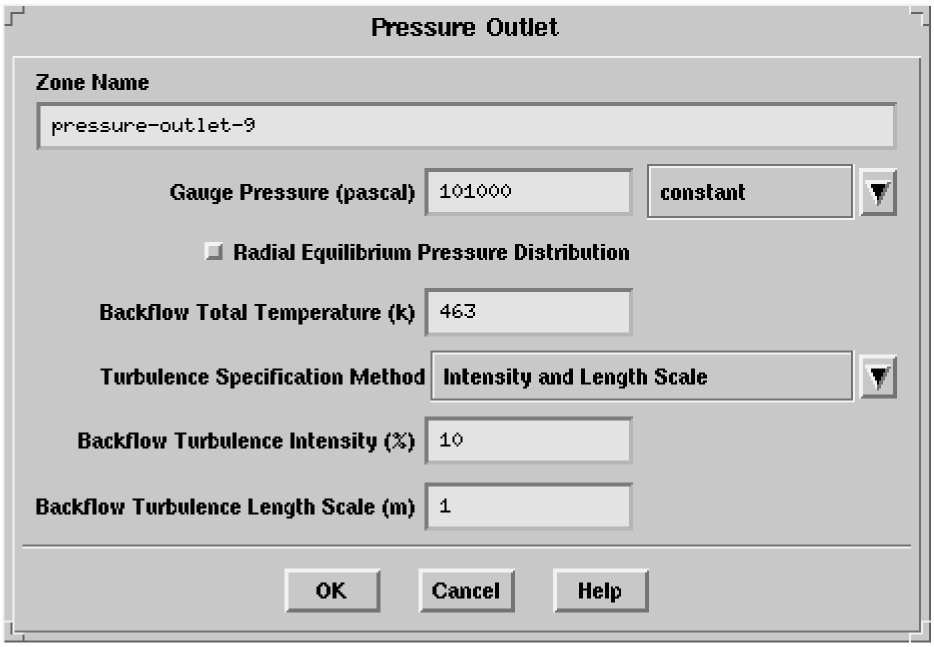


Figure 1: 压力出口面板

定义静压

要在压力出口边界设定静压，请在压力出口面板设定适当的 Gauge 压力值。这一值只用于压声速。如果出现当地超声速情况，压力要从上游条件推导出来。

需要记住的是这个静压和你在操作条件面板中的操作压力是相关的。请参阅有关于压力输入和静压头相关输入的解释。

FLUENT 还提供了使用平衡出口边界条件的选项。要使这个选项激活，打开辐射平衡压力分布。当这一功能被激活时，指定的 gauge 压力只用于边界处的最小最小半径位置（相对于旋转轴）。其余边界的静压是从辐射速度可忽略不计的假定中计算出来的，压力梯度由

下是给出：

$$\frac{\partial p}{\partial r} \equiv \frac{\rho v_\theta^2}{r}$$

其中 r 是从旋转轴的距离，v_q 是切向速度。即使旋转速度为零也可以使用这一边界条件。例如，它可以用于计算通过具有导流叶片的环面流动。
注意：辐射平衡出口条件，只用于三维或者轴对称涡流计算。

定义回流条件

与你所使用的模型一致的回流属性会出现在压力出口面板中。指定的值只用于通过出口进入的流动。

- 在包含能量的计算中要设定回流总温。
- 对于湍流计算，有几种定义湍流参数的方法。至于采用哪种方法，需要输入哪些值，请参阅决定湍流参数一节。湍流模型的相关介绍请参阅湍流模型一节。
- 如果你是用有限速度模型来模拟组分输运，你需要在组分质量分数框中设定回流组分质量分数。详情请参阅组分边界条件的设定。
- 如果你是使用 PDF 或者混合分数模型来模拟燃烧，你需要设定回流混合分数以及变化值，详情请参阅定义边界条件一节的第三步。
- 如果使用预混合燃烧模型，你需要设定回流发展变量。详情请参阅发展变量边界条件的设定。
- 如果你在模拟多相流动，你需要在体积分数框中设定二级相的回流体积分数。详情请参阅 VOF 模型、Cavitation 模型以及 ASM 模型边界条件的设定。
- 如果产生回流，你所指定的 Gauge 压力将作为总压使用，所以你不必明确的指定回流压力值。这一算例中，流动方向垂直于边界。

如果邻近压力出口的单元区域是移动的（也就是说，如果你使用旋转参考坐标系、多重参考坐标系、混合平面或者滑移网格）而且你是用分离解算器，那么速度对总压的动态贡献（参阅定义总压和总温一节中的方程 1）将是绝对或者相对于单元区域的运动，这取决于解面板中的绝对速度公式是否被激活。对于耦合解算器，定义总压和总温一节中方程 1 的速度（或者定义总压和总温一节中的方程 3 的马赫数）通常是在绝对坐标系中。
即使在收敛解中没有回流，你也应该设定比较现实的值来最小化收敛的困难，这是因为回流在计算过程中确实出现了。

定义辐射参数

如果你打算使用 P-1 辐射模型、DTRM 或者 DO 模型，你就需要设定内部发散率以及（可选）黑体温度。详情请参阅设定边界条件一节(Rosseland 不需要任何边界条件的输入)。

定义离散相边界条件

如果你是在模拟粒子的离散相，你就可以在速度入口设定粒子轨道详情请参阅离散向模型的边界设定。

压力出口边界的默认设定

Default settings (in SI) for pressure outlet boundary conditions are as follows:

Gauge Pressure 0

Backflow Total Temperature 300

Backflow Turb. Kinetic Energy 1

Backflow Turb. Dissipation Rate 1

压力出口边界的计算程序

在压力出口，FLUENT 使用出口平面 p_s 处的流体静压作为边界条件的压力，其它所有的条件从区域内部推导出来。

压力远场边界条件

FLUENT 中使用的压力远场条件用于模拟无穷远处的自由流条件，其中自由流马赫数和静态条件被指定了。压力远场边界条件通常被称为典型边界条件，这是因为它使用典型的信息（黎曼不变量）来确定边界处的流动变量。

这一边界条件只应用于当密度是用理想气体定律计算出来的情况。不可以适用于其它情况要有效地近似无限远处的条件，你必须建这个远场放到所关心的计算物体的足够远处。例如，在机翼升力计算中远场边界一般都要设到 20 倍弦长的圆周之外。

关于流动边界的概述，请参阅流动入口和出口一节。

压力远场边界的输入

概述

压力远场边界条件需要输入：

- 静压
- 马赫数
- 温度
- 流动方向
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 辐射参数(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 化学组分质量百分数（对于组分计算）。
- 离散相边界条件（对于离散相计算）

上面的所有值都由压力远场面板输入（Figure 1），它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节）。

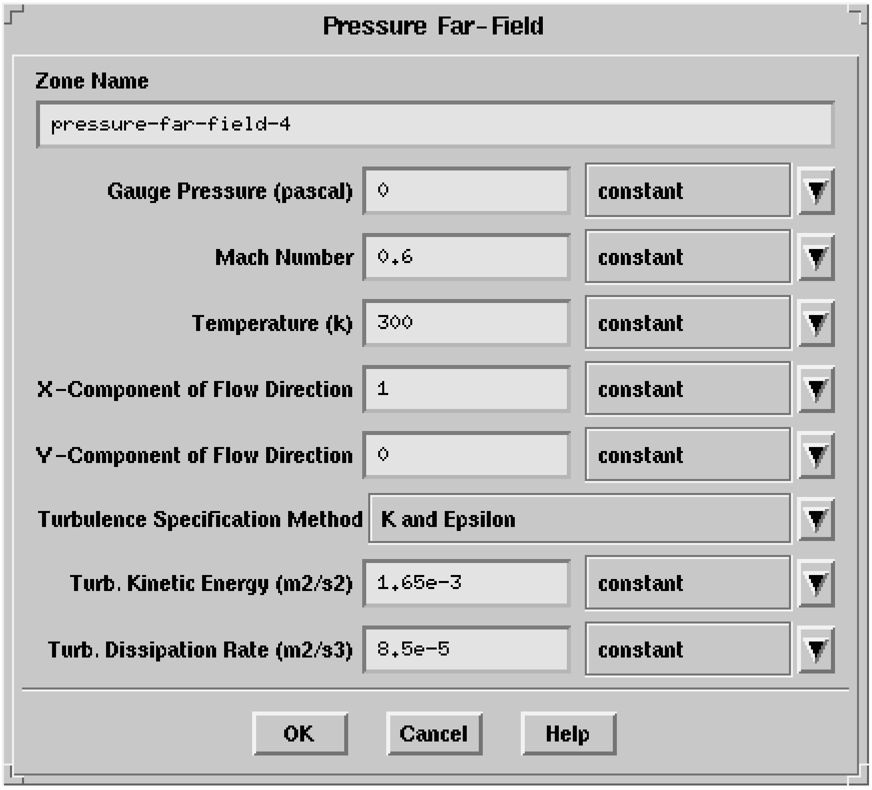


Figure 1: 压力远场面板

定义静压、马赫数和静温。

要设定远场边界的静压和静温，请在压力远场面板中输入适当的 Gauge 压力值和温度值以及马赫数。马赫数可以是亚音速，音速或者超音速。

定义流动方向

通过设定方向矢量的分量，你可以定义压力远场的流动方向。如果是二维非轴对称问题或者三维问题请在压力远场面板中输入刘道方向上适当的 X, Y 和(三维问题)Z 分量。如果是二维轴对称问题请输入适当的径向、轴向以及（如果模拟轴对称涡流）切向流动分量。

定义湍流参数

对于湍流计算，有几种方法来定义湍流参数。至于哪种方法合适该输入哪些相应数值请参阅决定湍流参数一节。湍流模型是在“湍流模型”一章中介绍

定义辐射参数

如果你打算使用 P-1 辐射模型、DTRM 或者 DO 模型，你就需要设定内部发散率以及（可选）黑体温度。详情请参阅设定边界条件一节(Rosseland 不需要任何边界条件的输入)。

定义组分输运参数

如果你用有限速度模型来模拟组分输运，你需要在组分质量分数框中设定组分质量分数，详情请参阅组分的边界条件定义。

定义离散相边界条件

如果你是在模拟粒子的离散相，你就可以在压力入口设定粒子轨道详情请参阅离散向模型的边界设定。

压力远场边界条件的默认设定

Default settings (in SI) for pressure far-field boundary conditions are as follows:

Gauge Pressure 0

Mach Number 0.6

Temperature 300

X-Component of Flow Direction 1

Y-Component of Flow Direction 0

Z-Component of Flow Direction 0

Turb. Kinetic Energy 1

Turb. Dissipation Rate 1

压力远场边界的计算程序

对于垂直于边界的一维流动在引入黎曼不变量（特征变量）的基础上，压力远场边界条件是非反射边界条件。对于压声速流动，有两个黎曼不变量，它符合入射波和反射波：

$$R_\infty = V_{n\infty} - \frac{2c_\infty}{\gamma - 1}$$

$$R_i = V_{n_i} - \frac{2c_i}{\gamma - 1}$$

其中 V_n 垂直于边界的速度量，c 是当地声速，c 为气体比热比。下标?是指应用于无穷远处的条件，下标 i 是用于内部区域的条件（即邻近于边界表面的单元）。将这两个变量相加减有如下两式：

$$V_{n_i} = \frac{1}{2}\left(R_i + R_\infty\right)$$

$$c = \frac{\gamma - 1}{4}\left(R_i - R_\infty\right)$$

其中 V_n 和 c 变成边界处应用的垂直速度分量值以及声速值。在通过流动出口的表面，切向分速度和焓有内部区域推导出来，在流入表面这些被指定为自由流的值。使用 V_n, c, 切向速度分量以及熵可以计算出边界表面的密度、速度、温度以及压力值。

质量出口边界条件

当流动出口的速度和压力在解决流动问题之前是未知时，FLUENT 会使用质量出口边界条件来模拟流动。你不需要定义流动出口边界的任何条件（除非你模拟辐射热传导、粒子的离散相或者分离质量流）：FLUENT 会从内部推导所需要的信息。然而，重要的是要知道这一

边界类型的限制。
注意：下面的几种情况不能使用质量出口边界条件：

- 如果包含压力出口，请使用压力出口边界条件
- 如果模拟可压流
- 如果模拟变密度的非定常流，即使流动是不可压的也不行。

关于流动边界的概述，请参阅流动入口和出口一节。

质量出口边界的 FLUENT 处理

FLUENT 在质量出口边界使用的边界条件为：

- 所有的流动变量具有零扩散流量
- 全部的质量平衡修正

流出单元应用零扩散流量意味着流出边界的平面是由区域内部推导出来，而对上游流动没有影响。当流出边界面积不变时，在假定与完全发展的流动相容的基础上，FLUENT 使用相应的推导程序，更新流出速度和压力。

FLUENT 在流出边界所应用的零扩散流量条件在物理上接近于完全发展流动。所谓的完全发展流动是指在流动方向上流动速度轮廓（和/或其它诸如温度属性的轮廓）不改变。注意，在质量出口边界条件中垂直于流向可能会由速度梯度。只有在垂直于出口平面的扩散流量被假定为零。

使用质量出口边界

正如前面所述，质量出口边界条件要保证流动是完全发展的，出口方向上的所有流动变量的扩散流量为零。但是，你也可以在流动没有完全发展的物理边界定义质量出口边界条件，在这种情况下你首先要有把握保证出口处的零扩散流量对流动解没有很大的影响。下面是使用质量出口边界的一个例子：

- 质量出口边界的法向梯度可以忽略不计：下图是一个简单的二维问题，有几个可能的质量出口边界。位置(D)表明流动边界在通风口的出口。在这里，假定对流占支配优势，边界条件非常符合，质量出口的位置也很得当。位置(C)是在通风口出口的上游，在这里流动是完全发展的。因此质量出口边界条件在这里也很合适。

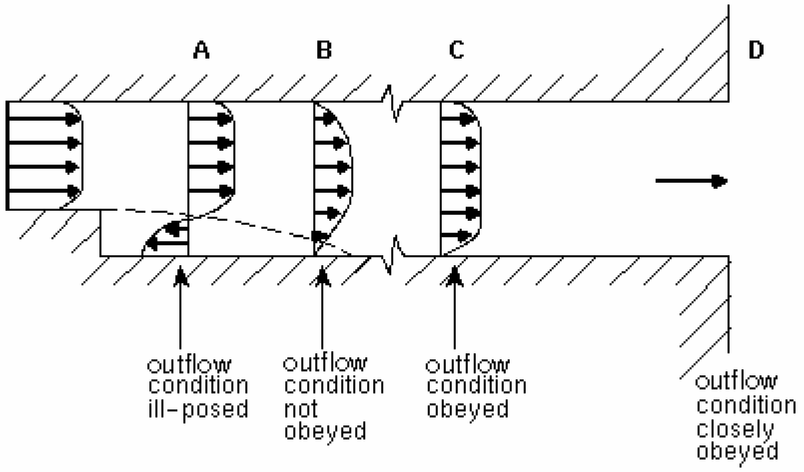


Figure 1:质量出口边界位置的选择

- 质量出口边界的错误位置：位置(B) 表明质量出口边界在后向表面步中，接近流动的再附着点。这样的选择是错误的，因为在回流点处垂直于出口表面的梯度相当的大，它会对流场上游有很大的影响。因为质量出口边界条件忽略这些流动的轴向梯度，所以位置(B)是一个较差的质量出口边界。出口位置应该移到再附着点的下游。
- 位置(A)是第二个质量出口边界的错误位置。在这里流动又通过质量出口边界回流到 FLUENT 计算域中。像这种情况，FLUENT 计算就不会收敛，计算的结果根本就没有用。这是因为当流动通过质量出口又回流到计算区域时，通过计算区域的质量流速是浮动的或者是未定义的。除此之外，当通过质量出口流入计算区域时，流动的标量属性是未定义的 (FLUENT 在流域内使用邻近于质量出口流体的温度来选择温度)。因此你应该以怀疑的观点来察看包括通过质量出口进入流域的所有计算。对于这样的计算，推荐使用压力出口边界条件。

注意：如果在计算中的任何点有回流流过质量出口边界，甚至解的最后结果不排除到区域内有任何的回流，收敛性都会受到影响。这一情况在湍流中尤其要注意。

质量流分离边界条件

在 FLUENT 中，可能会使用多重质量出口边界并指定流过边界的每一部分流动速度。在质量出口面板，设定流速权重以表明是哪一部分质量出口通过边界。

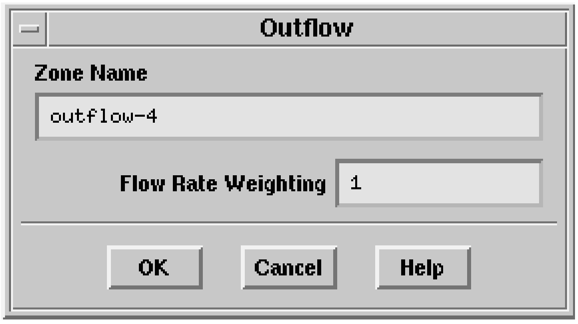


Figure 1: The Outflow Panel

流速权重是一个权因子：

$$percentage\ flow\ through\ boundary = \frac{flow\ rate\ weighting\ specified\ on\ boundary}{sum\ of\ flow\ rate\ weighting}$$

流速权重在所有的质量出口默认为 1。如果所有的流动出口边界是等分的或者只有一个质量出口边界，你就不必改变权重因子。FLUENT 会依比例决定通过所有质量出口边界的流动速度以获取相等的分数。因此，如果你有两个出口边界，并且希望通过每一个边界的流动为总流动的一半，你就不需要输入其它的东西了。然而如果你希望其中一个边界流出的为 75%，另一个为 25%，那么就必须明确的指定两个流速权重，也就是其中一个边界为 0.75，另一个为 0.25。

注意如果你指定一个出口的流速权重为 0.75，另一个不指定也就是默认为 1，那么流过每一个边界的分别为：

Boundary 1 = 0.75/（0.75+1.0） = 0.429 或者 42.9%

Boundary 2　= 1.0/（0.75+1.0）= 0.571 或者 57.1%

质量出口边界的输入

质量出口边界的辐射输入
一般说来，对于质量出口边界你不需要设定任何边界条件。然而，如果你打算使用 P-1 辐射模型、DTRM 或者 DO 模型，你就需要在出口面板设定内部发散率以及（可选）黑体温度。详情请参阅设定辐射边界条件一节。内部发散率的默认设定为 1，黑体温度的默认值为 300。

定义离散相边界条件

如果你是在模拟粒子的离散相,你就可以在压力入口设定粒子轨道详情请参阅离散相模型的边界设定。

通风口边界条件

通风口边界条件用于模拟具有指定损失系数以及周围（流出）环境压力和温度的通风口。

通风口边界的输入
通风口边界需要输入：

- 静压
- 回流条件
- 总温即驻点温度（用于能量计算)。
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 化学组分质量百分数（对于组分计算)。
- 混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算)。
- 发展变量（对于预混和燃烧计算)。
- 二级相的体积分数(对于多相流计算)
- 辐射参数(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 离散相边界条件（对于离散相计算）
- 损失系数

上面的所有值都由通风口面板输入（Figure 1)，它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节)。

前四项的指定方法和压力出口边界的方法相同。详情请参阅压力出口边界的输入一节。损失系数的指定在指定损失系数一节中描述。

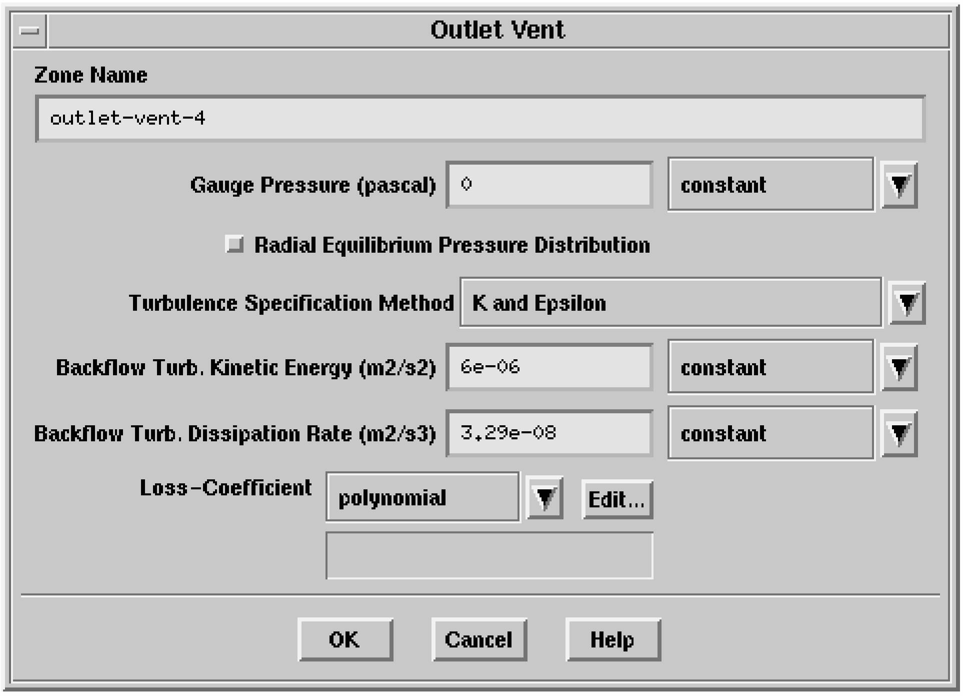


Figure 1: 通风口面板

指定损失系数

通风口被假定为无限薄，而且通过通风口的压降被假定与流体的动压头成比例，同时也要使用决定损失系数的经验公式。压降 D p 和垂直于通风口的速度分量 v 之间的关系式如下：

$$\Delta p = k_L \frac{1}{2} \rho v^2$$

其中 r 是流体密度，k_L 无量纲损失系数。

注意：D p 是流向压降，因此即使是在回流中，通风口都会出现阻力。

你可以定义通过通风口的损失系数为常量、多项式、分段线性函数或者垂向速度的分段多项式函数。定义这些函数的面板和定义温度相关属性的面板相同，详情请参阅使用温度相关函数定义属性一节。

排气扇边界条件

排气扇边界条件用于模拟具有指定压力跳跃和周围（流出）环境压力的外部排气扇

排气扇边界条件的输入

排气扇边界条件需要输入：

- 静压
- 回流条件
- 总温即驻点温度（用于能量计算）。
- 湍流参数（对于湍流计算）
- 化学组分质量百分数（对于组分计算）。
- 混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）。
- 发展变量（对于预混和燃烧计算）。

- 二级相的体积分数(对于多相流计算)
- 辐射参数(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 离散相边界条件（对于离散相计算）
- 压力跳跃

上面的所有值都由排气扇面板输入（Figure 1），它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节）。

前四项的指定方法和压力出口边界的方法相同。详情请参阅压力出口边界的输入一节。压力跳跃的指定在指定压力跳跃一节中描述。

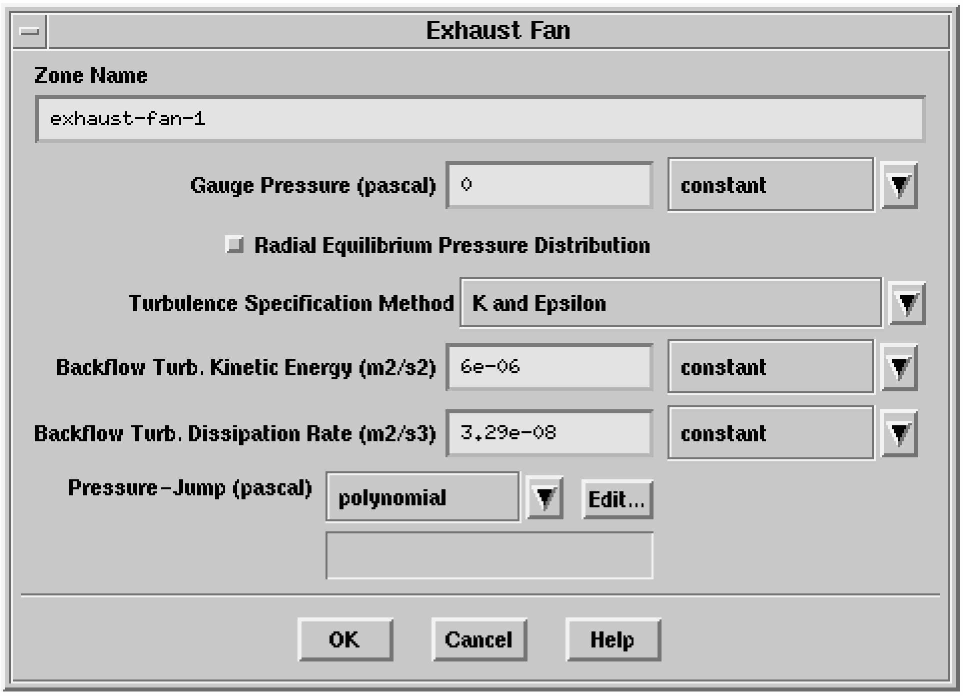


Figure 1: The Exhaust Fan Panel

指定压力跳跃

FLUENT 中模拟了排气扇，排气扇被假定为无限薄，并且通过排气扇具有不连续的压力升高，它是垂直于排气扇的当地流体速度的函数。你可以定义通过排气扇的压力跳跃为常量、多项式、分段线性函数或者分段多项式函数。定义这些函数的面板和定义温度相关属性的面板相同，详情请参阅使用温度相关函数定义属性一节。

模拟排气扇必须小心谨慎，要保证通过排气扇向前的流动压力有所升高。在回流算例中，排气扇被看成具有同一损失系数的进气口。

壁面边界条件

壁面边界条件用于限制流体和固体区域。在粘性流动中，壁面处默认为非滑移边界条件，但是你也可以根据壁面边界区域的平动或者转动来指定切向速度分量，或者通过指定剪切来模

拟滑移壁面(你也可以在 FLUENT 中用对称边界类型来模拟滑移壁面，但是使用对称边界就需要在所有的方程中应用对称条件。详情请参阅对称边界条件一节)。
在当地流场的详细资料基础上可以计算出流体和壁面之间的剪应力和热传导。

壁面边界的输入
概述
壁面边界条件需要输入下列信息：
- 热边界条件（对于热传导计算）
- 速度边界条件（对于移动或旋转壁面）
- 剪切（对于滑移壁面，此项可选可不选）
- 壁面粗糙程度（对于湍流，此项可选可不选）
- 组分边界条件（对于组分计算）
- 化学反应边界条件（对于壁面反应）
- 辐射边界条件(对于 P-1 模型、DTRM 或者 DO 模型的计算)
- 离散相边界条件（对于离散相计算）

在壁面处定义热边界条件
如果你在解能量方程，你就需要在壁面边界处定义热边界条件。在 FLUENT 中有五种类型的热边界条件：
- 固定热流量
- 固定温度
- 对流热传导
- 外部辐射热传导
- 外部辐射热传导和对流热传导的结合

如果壁面区域是双边壁面（在两个区域之间形成界面的壁面，如共轭热传导问题中的流/固界面）就可以得到这些热条件的子集，但是你也可以选择壁面的两边是否耦合。详情请参阅在壁面处定义热边界条件。
下面各节介绍了每一类型的热条件的输入。如果壁面具有非零厚度，你还应该设定壁面处薄壁面热阻和热生成的相关参数，详情请参阅在壁面处定义热边界条件。

热边界条件由壁面面板输入（Figure 1），它是从边界条件打开的（见设定边界条件一节）。

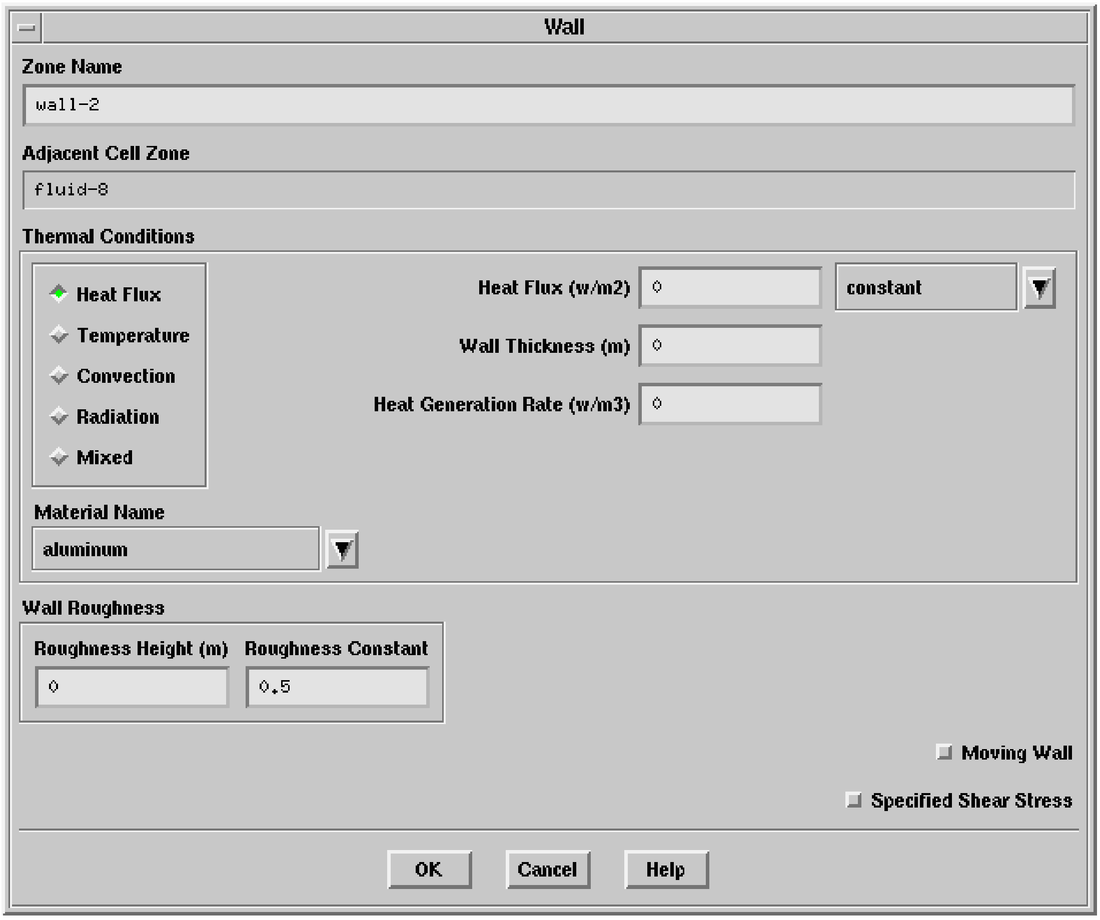


Figure 1:壁面面板

对于固定热流量条件，在热条件选项中选择热流量。然后你就可以在热流量框中设定壁面处热流量的适当数值。设定零热流量条件就定义了绝热壁，这是壁面的默认条件。

选择固定温度条件，在壁面面板中的热条件选项中选择温度选项。你需要指定壁面表面的温度。壁面的热传导可以用温度边界条件一节中的方程 1 或 3 来计算。

对于对流热传导壁面，在热条件中选择对流。输入热传导系数以及自有流温度，FLUENT 就会用对流热传导边界条件中的方程 1 来计算壁面的热传导。

如果你所模拟的是从外界而来的辐射热传导，你可以在壁面面板中激活辐射选项，然后设定外部发射率以及外部辐射温度。

如果选择混合选项，你就可以选择对流和辐射结合的热条件。对于这种条件，你需要设定热传导系数、自由流温度、外部发射率以及外部辐射温度。

默认情况下壁面厚度为零。然而你可以结合任何的热条件来模拟两个区域之间材料的薄层。例如：你可以模拟两个流体区域之间的薄金属片的影响，固体区域上的薄层或者两个固体区域之间的接触阻力。FLUENT 会解一维热传导方程来计算壁面所提供的热阻以及壁面内部的热生成。

在热传导计算中要包括这些影响，你就需要指定材料的类型，壁面的厚度以及壁面的热生成速度。在材料名字下拉菜单中选择材料类型，然后在壁面厚度框中指定厚度。壁面的热阻为 D x/k，其中 k 是壁面材料的热传导系数，D x 是壁面厚度。你所设定的热边界条件将在薄壁面的外部指定，如图 2 所示，其中 T_b 壁面处所指定的固定温度。

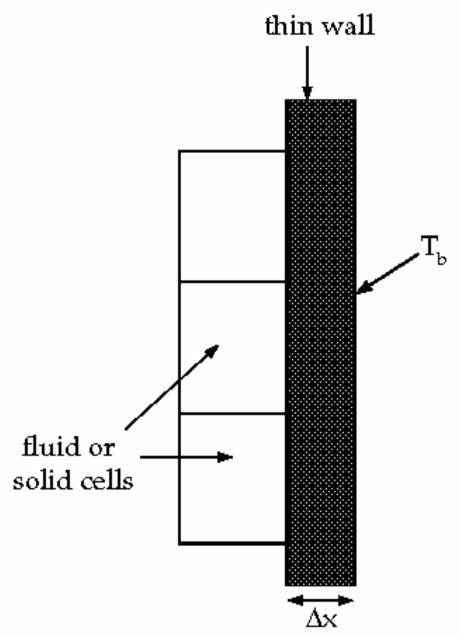


Figure 2: 热条件被指定在薄壁面的外侧

在热生成速度框中指定壁面内部热生成速度。这一选项是非常有用的，比方说，模拟已知电能分布的印刷电路板。

如果壁面区域的每一边是流体或者固体区域。当你具有这类壁面区域的网格读入到 FLUENT，一个阴影区域会自动产生，以便于壁面的每一边都是清楚的壁面区域。在壁面区域面板中，阴影区域的名字将在阴影表面区域框中显示出来。你可以选择在每一个区域指定不同的热条件或者将两个区域耦合：

- 要耦合壁面的两个边，在热条件选项中选择耦合选项(只有壁面是双边时这一选项才会出现在壁面面板中)。不需要输入任何附加的热边界信息，因为解算器会直接从相邻单元的解中计算出热传导。然而你可以指定材料类型、壁面厚度以及热生成速度来计算壁面热阻，详情请参阅壁面处热边界条件的定义一节。注意，你所设定的壁面每一边的阻抗参数会自动分配给它的阴影壁面区域。指定壁面内的热生成速度是很有用的，比如，模拟已知电能分布但是不知道热流量或者壁面温度的印刷电路板。
- 要解耦壁面的两个边，并为每一个边指定不同的热条件，在热条件类型中选择温度或者热流作为热条件类型(对于双边壁面，不应用对流和热辐射)。壁面和它的阴影之间的关系会被保留，以便于你在以后可以再次耦合它们。你需要设定所选的热条件的相关参数，前面对这方面的内容已经叙述过了不再重复。两个非耦合壁面具有不同的厚度，并且相互之间有效地绝缘。如果对于非耦合壁面指定非零厚度的壁面，你所设定的热边界条件就会在两个薄壁的外边的那个边指定，如图 3 所示，其中 T_b1 和 T_b2 分别是两个壁面的温度或者热流量。k_w1 和 k_w2 时耦合薄壁面的热传导率。注意图 3 中两个壁面之间的缺口并不是模型的一部分，它只是在图形中用来表明每一个非耦合壁面的热边界条件在哪里应用。

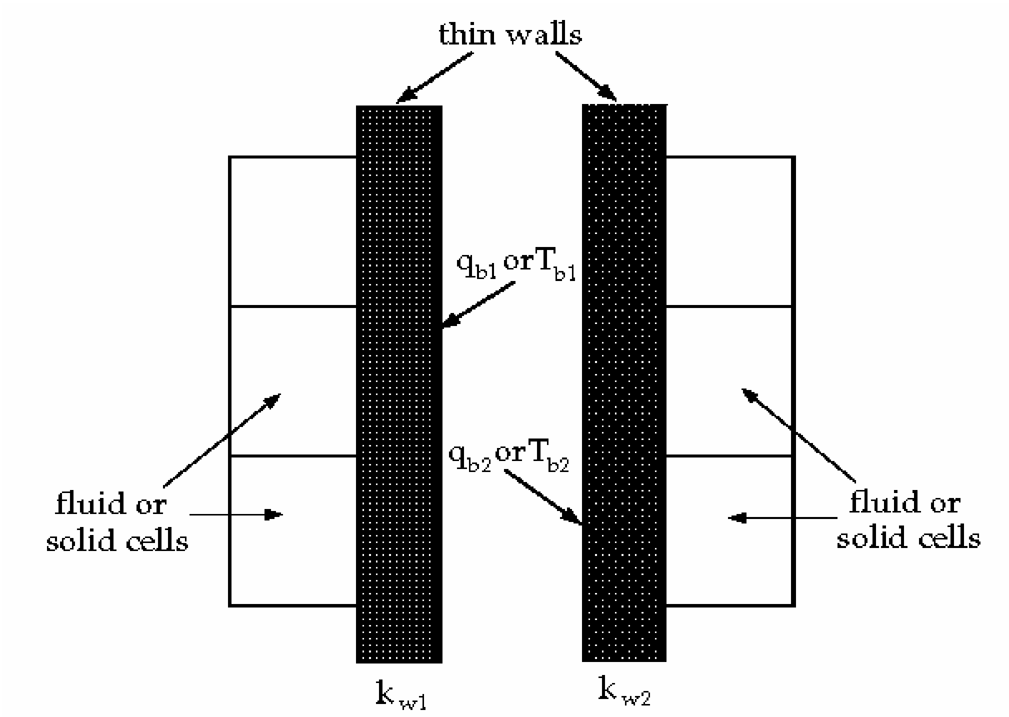


Figure 3: 热条件在非耦合薄壁的外边指定

对移动壁面定义速度条件

如果你希望在计算中包括壁面的切向运动，你就需要定义平动或者转动速度。壁面速度条件在壁面面板的运动部分输入，在这里你可以激活面板底部的移动壁面选项来显示和编辑，此时壁面面板会扩大显示为下图：

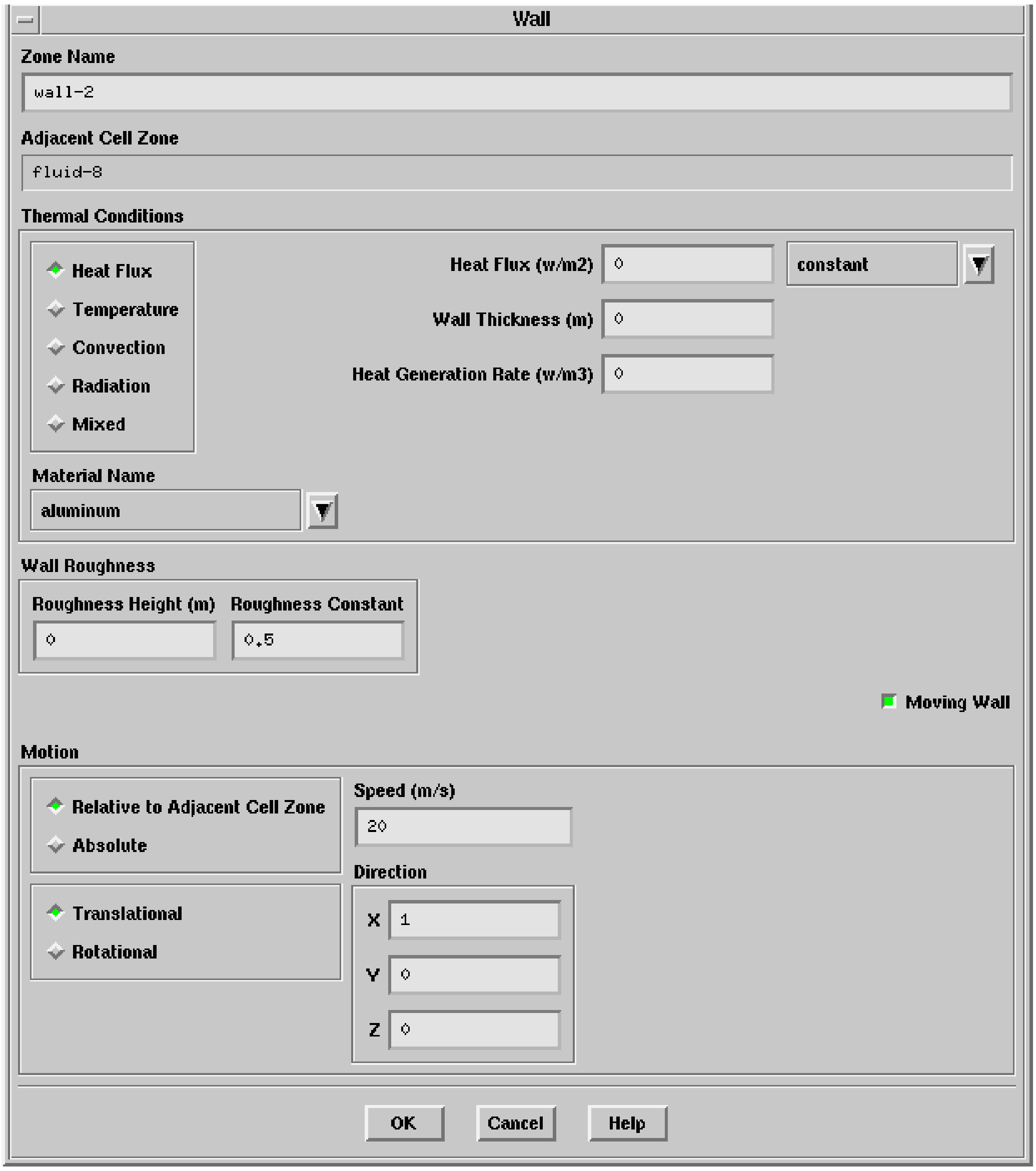


Figure 1: 移动壁面的壁面面板

如果邻近壁面的单元区域是移动的，（比如你使用移动参考系或者滑动网格）你可以激活相对邻近单元区域选项来选择指定的相对移动区域的移动速度。如果指定相对速度，那么相对速度为零意味着在相对坐标系中壁面是静止的，因此在绝对坐标系中以相对于邻近单元的速度运行。如果选择绝对速度（激活绝对选项），速度为零就意味着避免在绝对坐标系中是静止的，而且以相对于邻近单元的速度以动，但是在相对坐标系中方向相反。

如果你使用一个或多个移动参考系、滑动网格或者混合平面，并且你希望壁面固定在移动参考系上。推荐你指定相对速度（默认）而不是绝对速度。然后，如果你修改邻近单元区域的速度，就像你指定绝对速度一样，你就不需要对壁面速度做任何改变。

注意：如果邻近单元不是移动的那么它和相对选项是等同的。

对于包括线性，壁面边界是平动的问题（如以移动带作为壁面的矩形导管），你可以激活平动选项，并指定壁面速度和方向(X,Y,Z 矢量)。作为默认值，通过指定平动速度为零，壁面移动是未被激活的。

对于包括转动壁面运动的问题，你可以激活转动选项，并对指定的旋转轴定义旋转速度。要定义轴，请设定旋转轴方向和和旋转轴原点。这一轴和邻近单元区域所使用的旋转轴是无

关的，而且和其它的壁面旋转轴无关。对于三维问题旋转轴是通过指定坐标原点的矢量，它平行于在旋转轴方向框中指定的从(0,0,0)到(X,Y,Z)的矢量。对于二维问题，你只需要指定旋转轴起点，旋转轴是通过指定点的 z 向矢量。对于二维轴对称问题，你不必定义旋转轴：通常是绕 x 轴旋转，起点为(0,0)。

需要注意的是，只有在壁面限制表面的旋转时，模拟切向旋转运动才是正确的(比如圆环或者圆柱)。还要注意只有对静止参考系内的壁面才能指定旋转运动。

如定义壁面处热边界条件所讨论的，当你读入具有双边壁面的网格时（它在流/固区域形成界面），会自动形成阴影区域来区分壁面区域的每一边。对于双边壁面，壁面和阴影区域可能指定不同的运动，而不管它们耦合与否。然而需要注意的是，你不能指定邻近固体区域的壁面（或阴影）的运动。

模拟滑移壁面

作为默认，无粘流动的壁面是非滑移条件，但是在 FLUENT 中，你可以指定零或非零剪切来模拟滑移壁面。要指定剪切，在壁面面板中选择指定剪切应力项（见下图），然后你可以在剪切应力项中输入剪切的 x, y, 和 z 分量指定剪切应力选项不是用壁面函数。



Figure 1: 滑移壁面的壁面面板

在湍流壁面限制的流动中模拟壁面粗糙度的影响

流过粗糙表面的流体会有各种各样的情况。比如流过机翼表面、船体、涡轮机、换热器以及管系统的流动，还有具有各种粗糙度的地面上的大气边界层。壁面粗糙度影响了壁面处的阻力、热传导和质量输运。

如果你是在模拟具有壁面限制的湍流流动，壁面粗糙度的影响是很大的，你可以通过修改壁面定律的粗糙度来考虑避免粗糙度影响。

粗糙管和隧道的实验表明了当用半对数规则画图时，近粗糙壁面的平均速度分布具有相同的坡度(1/k)但是具有不同的截止点(在对数定律中附加了常数 B)。对于粗糙壁面，平均速度的壁面定律具有的形式为：

$$\frac{u_p u^*}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\tau} \ln\left(E \frac{\rho u^* y_p}{\mu} \right) - \Delta B$$

其中 u^* = C_m^1/4k^1/2； ΔB 是粗糙度函数，它衡量了由于粗糙影响而导致的截止点的转移。一般说来，ΔB 依赖于粗糙的类型(相同的沙子、铆钉、螺纹、肋、铁丝网等)和尺寸。对于各种类型的粗糙情况没有统一而有效的公式。然而，对于沙粒粗糙情况和各种类型的统一粗糙单元，人们发现 ΔB 和无量纲高度 K_s ^+ = r K_s u^*/m 具有很好的相关性，其中 K_s 是物理粗糙高度 u^* = C_m^1/4k^1/2。实验数据分析表明粗糙函数 ΔB 并不是 K_s^+ 的单值函数，而是依赖于 K_s^+的值有不同的形式。观察表明有三种不同的类型：

- 液体动力光滑(K_s^+ < 3 ~ 5)
- 过渡区(3 ~ 5 < K_s^+ < 70 ~ 90)
- 完全粗糙(K_s^+ > 70 ~ 90)

根据上述数据，在光滑区域内粗糙度的影响可以忽略，但是在过渡区域就越来越重要了，在完全粗糙区域具有完全的影响。

在 FLUENT 中，整个粗糙区域分为三个区域。粗糙函数 ΔB 的计算源于 Nikuradse's 数据[27]基础上的由 Cebeci 和 Bradshaw 提出的公式：

对于液体动力光滑区域(K_s^+ < 2.25)：

$$\Delta B = 0$$

对于过渡区(2.25 < K_s^+ < 90)：

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln\left[\frac{K_s^+ - 2.25}{87.25} + C_{K_s} K_s^+ \right] \times \sin\left\{ 0.4258 \left(\ln K_s^+ - 0.811 \right) \right\}$$

其中 C_K_s 为粗糙常数，依赖于粗糙的类型。

在完全粗糙区域(K_s^+ > 90)：

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln\left(1 + C_{K_s} K_s^+ \right)$$

在解算器中，给定粗糙参数之后，粗糙函数 ΔB (K_s^+)用相应的公式计算出来。方程 1 中的修改之后的壁面定律被用于估计壁面处的剪应力以及其它的对于平均温度和湍流量的壁面函数。

要模拟壁面粗糙的影响，你必须指定两个参数：粗糙高度 K_s 和粗糙常数 C_K_s。默认的粗糙高度为零，这符合光滑壁面。对于产生影响的粗糙度，你必须指定非零的 K_s。对于同沙粒粗糙情况，沙粒的高度可以简单的被看作 K_s。然而，对于非同一沙粒平均直径(D_50)应该是最有意义的粗糙高度。对于其它类型的粗糙情况，需要用同等意义上的沙粒粗糙高度 K_s。

适当的粗糙常数(C_K_s)主要由给定的粗糙情况决定。默认的粗糙常数(C_K_s = 0.5)是用来满足在使用 k-e 湍流模型时，它可以在具有同一沙粒粗糙的充满流体的管中再现 Nikuradse's 阻力数据。当你模拟和同一沙粒粗糙不同的情况时，你就需要调解粗糙常数了。例如，有些实验数据表明，对于非同一沙粒、肋和铁丝网，粗糙常数(C_K_s = 0.5 ~ 1.0)具有更高的值。不幸的是，对于任意类型的粗糙情况还没有一个清楚的选择粗糙常数 C_K_s 的指导方针。需要注意的是，要求邻近壁面单元应该小于粗糙高度并不是物理意义上的问题。对于最好的结果来说，要保证从壁面到质心的距离要比 K_s 大。

定义壁面的组分边界条件

FLUENT 默认所有的组分在壁面处具有零梯度条件（除了参加表面化学反应的组分），但是可以指定壁面处的组分质量分数。也就是如同在入口处指定的 Dirichlet 边界条件，也可以用于壁面。

如果你希望保留默认的零梯度条件，你就不必输入任何东西了。如果你希望指定壁面处的组分质量分数，步骤如下：

1. 在壁面面板的组分边界条件中，选择组分名字右边的下拉列表指定的质量分数（而不是零梯度），此时面板会扩展为包含组分质量分数的对话框。

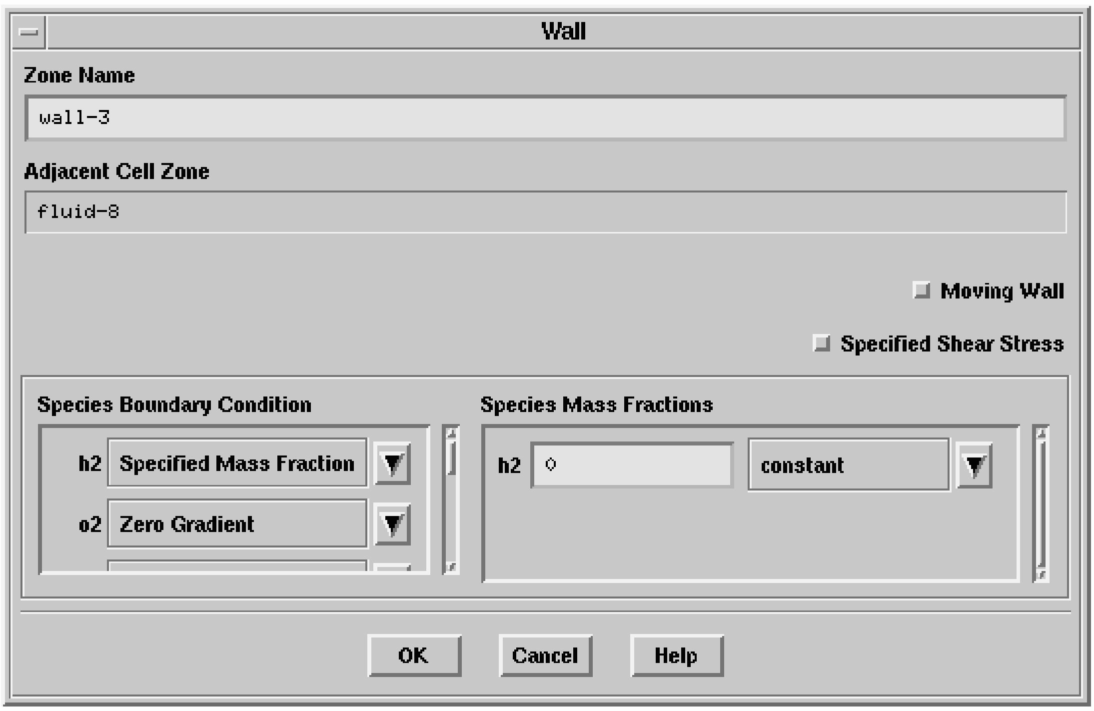


Figure 1: 组分边界条件输入的壁面面板

2. 输入相应的组分质量分数。

每一组分的边界条件类型是分别指定的，所以对于不同的组分你可以采用不同的方法。

注意：如果在湍流流动中你使用组分的 Dirichle 条件，FLUENT 就不会是用壁面函数来计算壁面处的组分扩散流量。

定义壁面的反应边界条件

如果你在组分模型面板中激活了表面反应的模拟，你就可以表明在壁面处表面反应是否被激

活。激活或关闭表面反应，壁面面板就会相应地打开或关闭表面反应选项。
注意：组分在壁面处是假定为零梯度条件的，它不参加任何表面反应。

定义壁面的辐射边界条件

如果你打算使用 P-1 辐射模型、DTRM 或者 DO 模型，你就需要设定壁面的（内部）发散率以及（可选）黑体温度。详情请参阅设定边界条件一节(Rosseland 不需要任何边界条件的输入，因为 FLUENT 假定发射率为 1，如果你使用 DO 模型你也要定义壁面为漫反射、镜面反射或者半透明，详情请参阅设定辐射边界条件)

定义壁面的离散相边界条件

如果你是在模拟粒子的离散相，你就可以在壁面处设定粒子轨道详情请参阅离散向模型的边界设定。

壁面边界的默认设定

默认热边界条件为固定的热流为零，壁面默认为不移动。

壁面处的剪应力计算程序

对于非滑移壁面条件，FLUENT 使用邻近壁面或者流体边界的流动性质来预测壁面处流体的剪应力。在层流流动制，这一计算简单地依赖于壁面处的速度梯度，在湍流流动中则使用壁面限制湍流流动的近壁面处理方法。
对于指定剪切的壁面， FLUENT 会在边界处计算切向速度。
如果是无粘流动，所有的壁面都使用滑移条件，所以它们是无摩擦的而且对邻近流体单元不施加剪应力。

层流中的剪应力计算
在层流流动中壁面剪应力和法向速度梯度的关系为：

$$\tau_w = \mu \frac{\partial v}{\partial n}$$

当壁面处的速度梯度很大时，你必须保证网格足够精细，这样才能解出边界层的精确结果。层流流动中近壁面节点放置的指导方针在节点密度和节点束中介绍。

湍流中的剪应力计算

湍流流动的壁面处理，在壁面限制的湍流流动的近壁面处理一节中叙述。

壁面边界的热传导计算

温度边界条件

当在壁面处应用固定温度条件，从流体单元到壁面的热传导，由下式计算：

$$q'' = h_f\left(T_w - T_f\right) + q''_{rad}$$

其中：
h_f =流体边界当地热传导系数
T_w =壁面表面温度
T_f =当地流体温度
q^"=壁面处传来的对流热流量
q^"_rad=辐射热流量
注意：流体边界热传导系数是基于当地流场条件计算得来的（比如说湍流层次、温度以及速度轮廓），请参阅流体边界热传导计算一节的方程 1，以及标准壁面函数 9。
从固体单元到壁面边界的热传导公式为：

$$q'' = \frac{k_n}{\Delta n}\left(T_w - T_s\right) + q''_{rad}$$

其中：
k_s =固体的热传导率
T_s =当地固体温度
D n =壁面表面和固体单元中心的距离。

热流边界条件

当你在壁面处定义热流边界条件时，你需要在壁面表面指定热流量。FLUENT 使用温度边界条件中的方程 1，然后你就可以输入热流量来确定邻近流体单元的壁面表面温度：

$$T_w = \frac{q'' - q''_{rad}}{h_f} + T_f$$

其中，流体边界热传导系数已经在温度边界条件中叙述了，它是基于当地流场条件计算得到的。当壁面和固体区域交界时，壁面表面的温度为：

$$T_w = \frac{\left(q'' - q''_{rad}\right)\Delta n}{k_n} + T_s$$

上述两式的变量请参阅温度边界条件一节。

对流热传导边界条件

当你在壁面处指定对流热传导系数作为边界条件时，FLUENT 使用你所输入的外部热传导系数以及外部热沉（heat sink）温度来计算到壁面的热流量：

$$q'' = h_f\left(T_w - T_s\right) + q''_{rad} = h_{ext}\left(T_{ext} - T_w\right)$$

其中：
h_ext =你所定义的外部热传导系数
T_ext =你所定义的外部热沉温度
q^"_rad =辐射热流量
上述方程假定壁面零厚度。

外部辐射边界条件
当使用外部辐射条件时，流入壁面的热流量为：

$$q'' = h_f\left(T_w - T_s\right) + q''_{rad} = \varepsilon_{est}\left(T_\infty^4 - T_w^4\right)$$

其中：
e_ext=你所定义的外部壁面表面的发射率
s=Stefan-Boltzmann 常数
T_w =壁面的表面温度
T_?=区域外部的温度的辐射源或者消失（sink）处
q^"_rad=从内部去向壁面辐射的热流量
Equation 1 假定壁面厚度为零。

外部对流和辐射结合的边界条件
当你选择组合的外部热传导方程条件时，到壁面的热流量为：

$$q'' = h_f\left(T_w - T_f\right) + q''_{rad} = h_{est}\left(T_{ext} - T_w\right) + \varepsilon_{ext}\sigma\left(T_\infty^4 - T_w^4\right)$$

其中的变量已经在对流热传导边界条件和外部辐射边界条件中定义了。Equation 1 假定壁面厚度为零。

流动边界热传导系数的计算

在层流流动中，壁面处流体边界热传导是用应用于壁面的 Fourier 定律计算得到的，FLUENT 使用它的离散格式为：

$$q'' = k_f \left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{wall}$$

其中 n 是垂直于壁面的当地坐标。
对于湍流流动，FLUENT 对于从热和动量迁移中类比得到的温度使用壁面定律[93]。详细内容请参阅标准壁面函数。

对称边界条件

对称边界条件用于所计算的物理外形以及所期望的流动/热解具有镜像对称的特征的情况中。也可以用它们来模拟粘性流动的滑移壁面。本节描述了对称平面内流动的处理，并提供了一些使用对称边界的例子。在对称边界条件中你不需要定义任何边界条件，但是你必须谨慎地定义对称边界的位置。
在对称外形的中线处，你应该使用轴边界类型而不是对称边界类型，如轴边界条件一节中的的图 1，详细内容请参阅轴边界条件。

对称边界的计算程序

FLUENT 假定所有量通过对称边界的流量为零。经过对称平面的对流流量为零，因此对称边界的法向速度为零。通过对称平面没有扩散流量：因此所有流动变量的法向梯度在对称平面内为零。因此对称边界条件可以总结如下：

- 对称平面内法向速度为零
- 对称平面内所有变量的法向梯度为零

如上所述，对称的定义要求这些条件决定流过对称平面的流量为零。因为对称边界的剪应力为零，所以在粘性流动计算中它也可以用滑移壁面来解释。

对称边界的例子

对称边界用于减少计算模拟的范围，它只需要模拟所有物理系统的一个对称子集。下面两个图是通过该种方法使用对称边界的例子。

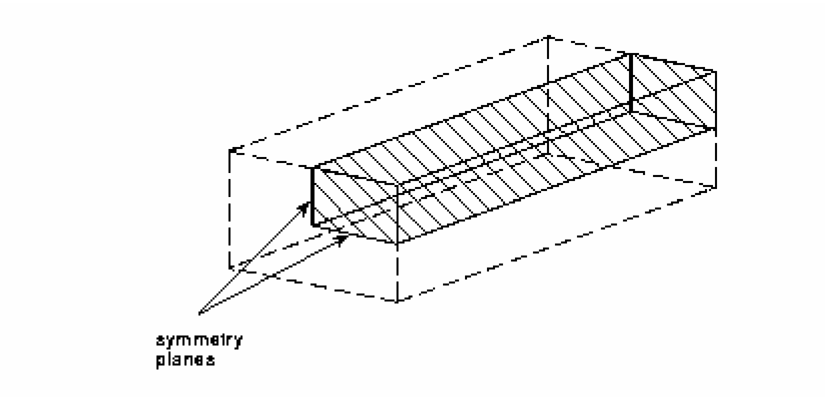


Figure 1:使用对称边界模拟三维管道的四分之一

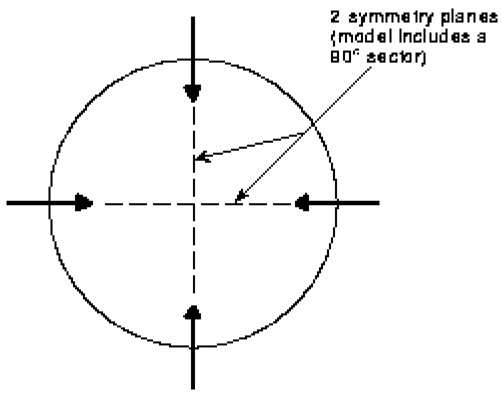


Figure 2: 使用对称边界模拟圆形截面的四分之一

下面的图则是误用对称平面的两个例子，在这两个例子中，虽然几何外形是对称的，但是流动本身却不符合对称边界条件的要求。在第一个例子中浮力产生了非对称流动。在第二个例子中，流动中的涡流产生了一个垂直于应该是对称平面的流动。。需要注意的是，这两个粒子都要使用旋转周期性边界（请参阅周期性边界一节的图一）

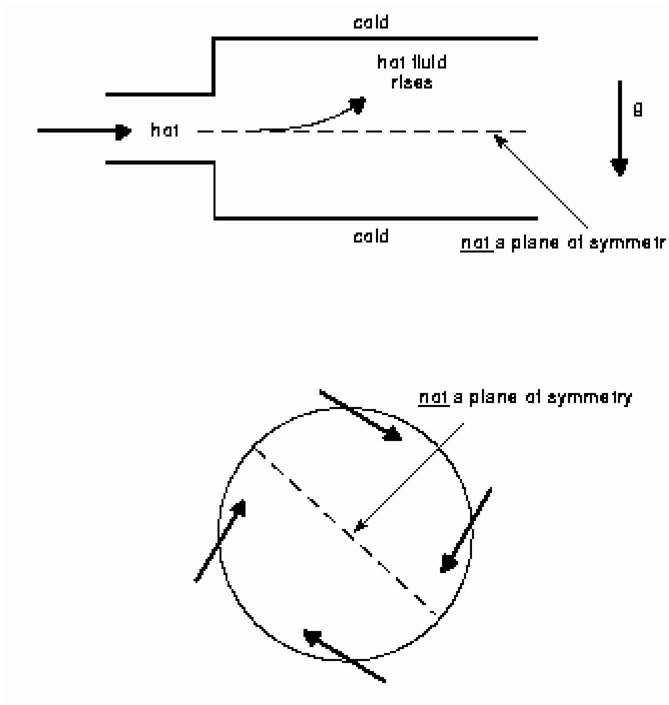


Figure 3: 对称的误用

周期性边界条件

周期性边界条件用来解决，物理模型和所期待的流动的流动/热解具有周期性重复的特点。FLUENT 提供了两种类型的周期性边界条件。第一种类型不允许通过周期性平面具有压降（对于 FLUENT4 用户来说：这一类型的周期性边界是指 FLUENT4 中的圆柱形边界）。第二种类型允许通过平移周期性边界具有压降，它是你能够模拟完全发展的周期性流动（在 FLUENT4 中是周期性边界）。
本节讨论了无压降的周期性边界条件。在周期性流动和热传导一节中，完全发展的周期性模拟能力得到了详尽的描述。

周期性边界的例子

周期性边界条件用于模拟通过计算模型内的两个相反平面的流动是相同的情况。下图是周期性边界条件的典型应用。在这些例子中，通过周期性平面进入计算模型的流动和通过相反的周期性平面流出流场的流动是相同的。正如这些例子所示，周期性平面通常是成对使用的。

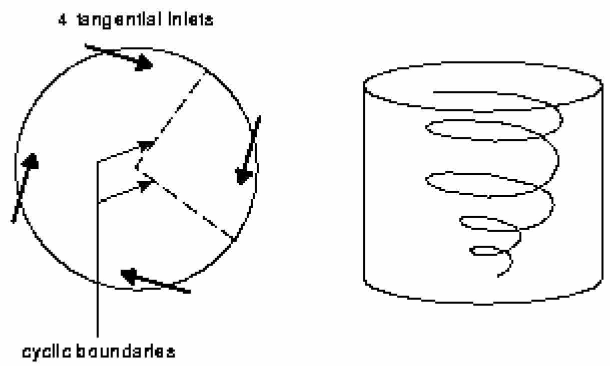


Figure 1: 在圆柱容器中使用周期性边界定义涡流

周期性边界的输入

对于没有任何压降的周期性边界，你只需要输入一个东西，那就是你的所模拟的几何外形是旋转性周期还是平移性周期。（对于有周期性压降的周期流还要输入其它的东西，请参阅周期性流动和热传导一节。）

旋转性周期边界是指关于旋转对称几何外形中线形成了一个包括的角度。本节中的图一就是旋转性周期。平移性周期边界是指在直线几何外形内形成周期性边界。下面两图是平移性周期边界：

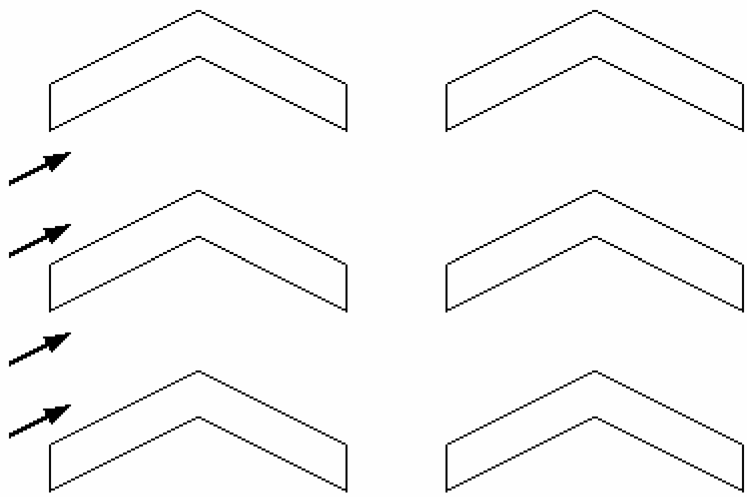


Figure 1: 物理区域

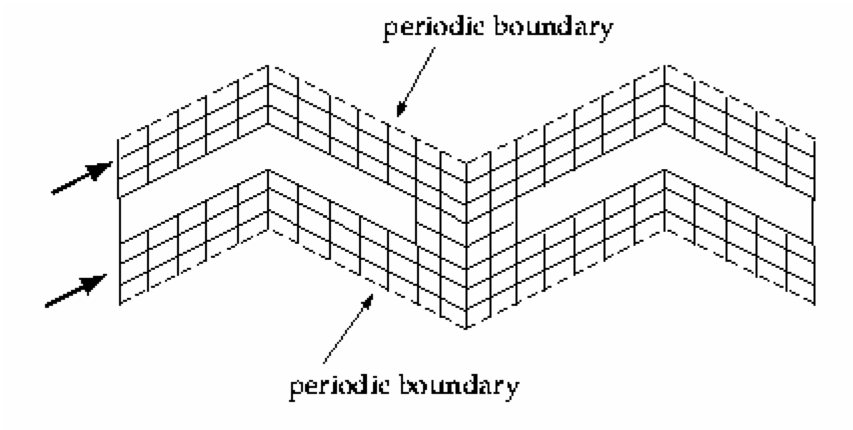


Figure 2: 所模拟的区域

对于周期性边界，你需要在周期性面板（下图）中指定平移性边界还是旋转性边界，该面板是从设定边界条件菜单中打开的。

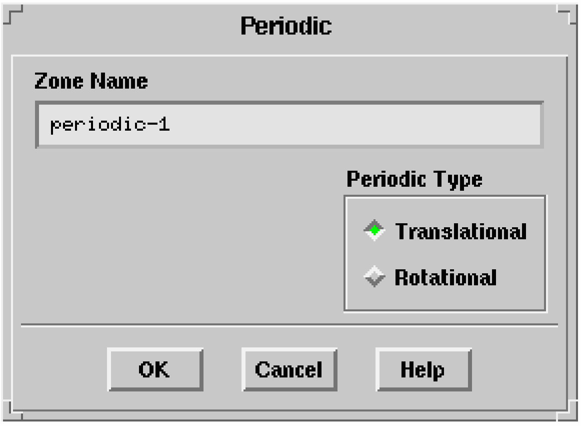


Figure 3: 周期性面板

(对于耦合解算器，周期性面板中将会有附加的选项，这一选项允许你指定压力跳跃，详细内容请参阅周期性流动和热传导一节。)

如果区域是旋转性区域，请选择旋转性区域类型。如果是平移性就选择平移性区域类型。对于旋转性区域，解算器会自动计算通过周期性区域的旋转角度。旋转轴是为邻近单元指定的旋转轴。

注意：对于使用旋转周期性边界来说，你不必指定邻近单元区域为移动的。例如，你能够使用具有管的平切片的非旋转坐标系来模拟三维管流，管的切片需要具有旋转性周期。

你可以使用 Grid/Check 菜单选项（参阅检查网格一节）来计算和显示周期性边界所有表面的旋转角度的最大值、最小值和平均值。如果最大值、最小值和平均值之间的差别可以忽略 ，那么网格有一个问题：对于指定轴来说网格几何外形不是周期性的。

周期性边界的默认设定

默认为平移周期性边界条件

周期性边界的计算程序

FLUENT 在周期性边界处理流动就像反向周期性平面是和前面的周期性边界直接相邻一样，因此，当计算流过邻近流体单元的周期性边界时，就会使用与反向周期性平面相邻的流体单元的流动条件。

轴边界的计算程序

轴边界条件

轴边界类型必须使用在对称几何外形的中线处（见下图）。它也可以用在圆柱两极的四边形和六面体网格的中线上（比如：像 FLUENT4 之类的结构网格生成代码所产生的网格）。在轴边界处，你不必定义任何边界条件。

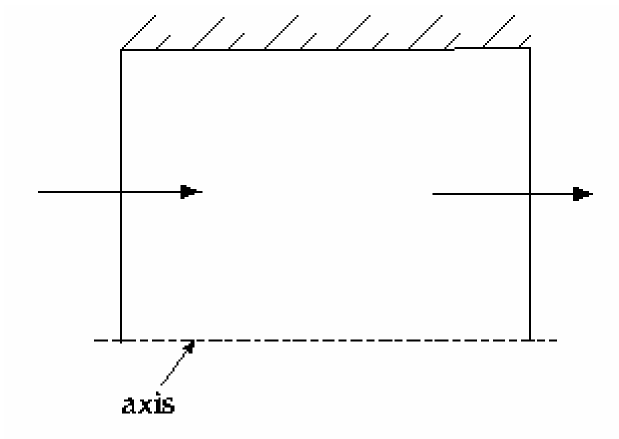


Figure 1: 在轴对称几何外形的中线处轴边界条件的使用

轴边界的计算程序
要确定轴上特定点的适当物理值，FLUENT 使用邻近单元中的单元值。

流体条件

流体区域是一组所有现行的方程都被解出的单元。对于流体区域只需要输入流体材料类型。你必须指明流体区域内包含哪种材料，以便于使用适当的材料属性。

如果你模拟组分输运或者燃烧，你就不必在这里选择材料属性，当你激活模型时，组分模型面板中会指定混合材料。相似地，对于多相流动你也不必指定材料属性，当你在多相流模型面板中激活模型时，你会选择它们。

可选择的输入允许你设定热、质量、动量、湍流、组分以及其它标量属性的源项。你也可以为流体区域定义运动。如果邻近流体区域内具有旋转周期性边界，你就需要指定旋转轴。如果你使用 k-e 模型或者 Spalart-Allmaras 模型来模拟湍流，你可以选择定义流体区域为层流区域。如果你用 DO 模型模拟辐射，你可以指定流体是否参加辐射。对于多孔区域的信息，请参阅多孔介质条件一节。

流体区域的输入

在流体面板中（下图），你需要设定所有的流体条件，该面板是从设定边界条件菜单中打开的。

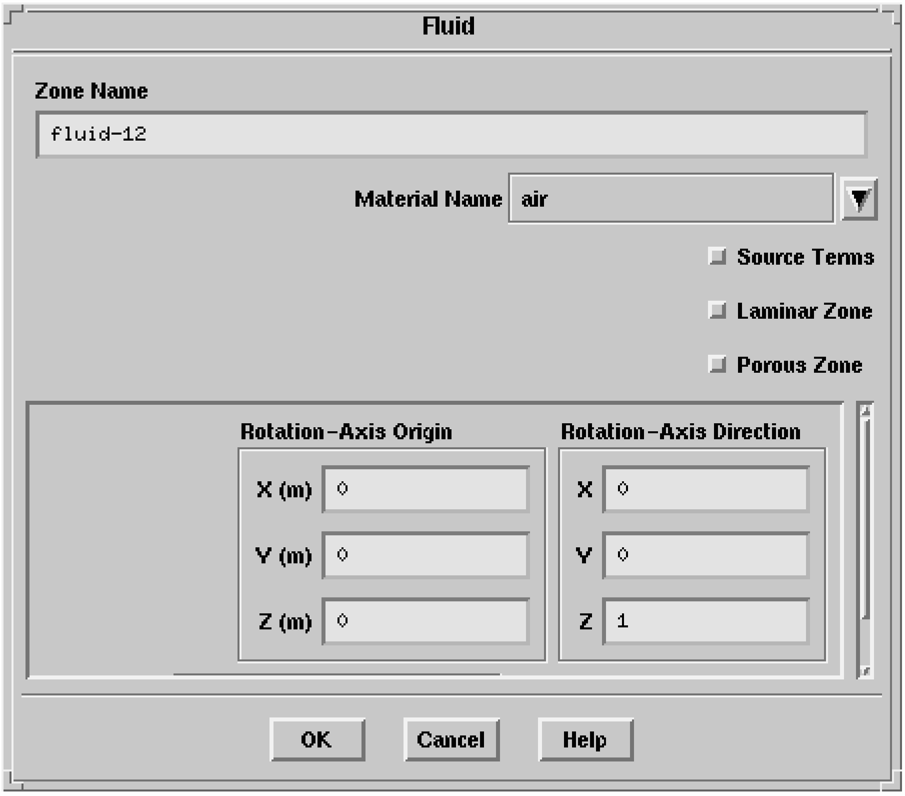


Figure 1: 流体面板

定义流体材料

要定义流体区域内包含的材料，请在材料名字下拉列表中选择适当的选项。这一列表中会包含所有已经在使用材料面板中定义的流体材料（或者从材料数据库中加载）。
如果你模拟组分输运或者多相流，在流体面板的下拉列表中不会出现材料名。对于组分计算，所有流体区域的混合材料将会是你在组分模型面板中所指定的材料。对于多相流，所有流体区域的材料将会是你在多相流模型面板中所指定的材料。

定义源项

如果你希望在流体区域内定义热、质量、动量、湍流、组分以及其它标量属性的源项，你可以激活源项选项来实现。详情请参阅定义质量、动量、能量和其它源项一节。

指定层流区域

如果你使用 k-e 模型或者 Spalart-Allmaras 模型来模拟湍流，在指定的流体区域关掉湍流模拟是可能的（即：使湍流生成和湍流粘性无效，但是湍流性质的输运仍然保持）。如果你知道在某一区域流动是层流这一功能是很有用的。比方说：如果你知道机翼上的转唳点的位置，你可以在层流单元区域边界和湍流区域边界创建一个层流/湍流过渡边界。这一功能允许你模拟机翼上的湍流过渡。要在流体区域内取消湍流模拟，请在流体面板中打开层流区域选项。

指定旋转轴

　　如果邻近流体区域存在旋转性周期边界，或者区域是旋转的，你必须指定旋转轴。要定义旋转轴，请设定旋转轴方向和起点。这个轴和任何邻近壁面区域或任何其它单元区域所使用的旋转轴是独立的。对于三维问题，旋转轴起点是从旋转轴起点中输入的起点，方向为旋转轴方向选项中输入的方向。对于二维非轴对称问题，你只需要指定旋转轴起点，方向就是通过指定点的 z 方向。（z 向是垂直于几何外形平面的，这样才能保证旋转出现在该平面内）。对于二维轴对称问题，你不必定义轴，旋转通常就是关于 x 轴的，起点为(0,0)。

定义区域运动

对于旋转和平移坐标系要定义移动区域，请在运动类型下菜单(如果你用滚动条向右滚动到旋转轴起点和方向，就是可见的了)中选择运动参考坐标系。然后在面板的扩展部分设定适当的参数。
要对移动或者滑移网格定义移动区域，在移动类型下拉列表中选择移动网格，然后在扩展面板中设定适当的参数。详情请参阅滑动网格。

对于包括线性、平移运动的流体区域问题，通过设定 X, Y,和 Z 分量来指定平移速度。对于包括旋转运动的问题，在旋转速度中指定旋转速度。旋转轴的定义请参阅指定旋转轴一节。关于在移动参考系中模拟流动的详细内容请参阅移动区域的流动一节。

定义辐射参数

如果你使用 DO 辐射模型，你可以用参加辐射选项指定流体区域是否参加辐射的计算。详情请参阅辐射边界条件一节。

固体条件

固体区域是仅用来解决热传导问题的一组区域。作为固体处理的材料可能事实上是流体，但是假定其中没有对流发生。固体区域仅需要输入材料类型。你必须表明固体区域包含哪种材料，以便于计算是使用适当的材料。可选择的输入允许你设定体积热生成速度（热源）。你也可以定义固体区域的运动。如果在邻近的固体单元内有旋转性周期边界，你就需要指定旋转轴。如果你模拟 DO 辐射模型，你可以指定固体材料是否参加辐射的计算。

固体区域的输入

流体区域的输入

在固体面板中（下图），你需要设定所有的固体条件，该面板是从设定边界条件菜单中打开的。

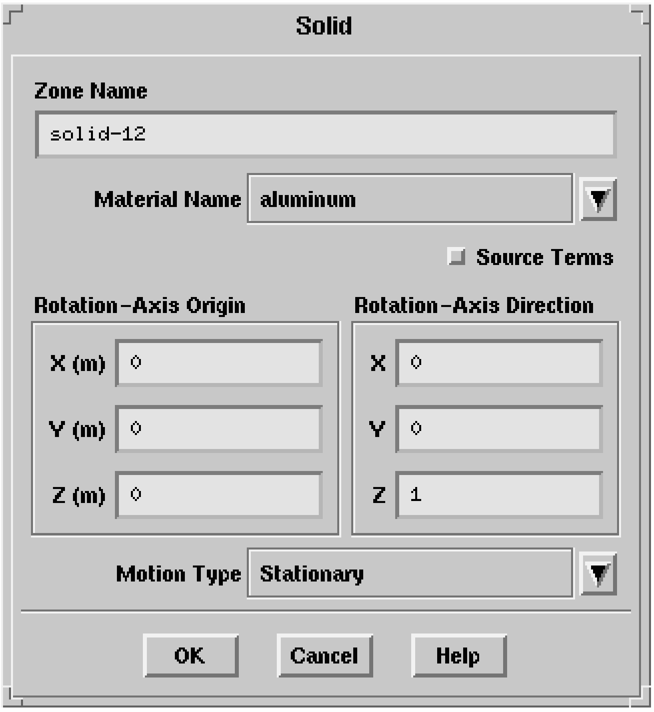


Figure 1: 固体面板

定义流体材料

要定义固体区域内包含的材料，请在材料名字下拉列表中选择适当的选项。这一列表中会包含所有已经在使用材料面板中定义的固体材料（或者从材料数据库中加载）。

定义热源

如果你希望在固体区域内定义热源项，你可以激活源项选项来实现。详情请参阅定义质量、动量、能量和其它源项一节。

指定旋转轴

如果邻近固体区域存在旋转性周期边界，或者区域是旋转的，你必须指定旋转轴。要定义旋转轴，请设定旋转轴方向和起点。这个轴和任何邻近壁面区域或任何其它单元区域所使用的旋转轴是独立的。对于三维问题，旋转轴起点是从旋转轴起点中输入的起点，方向为旋转轴方向选项中输入的方向。对于二维非轴对称问题，你只需要指定旋转轴起点，方向就是通过指定点的 z 方向。（z 向是垂直于几何外形平面的，这样才能保证旋转出现在该平面内）。对于二维轴对称问题，你不必定义轴，旋转通常就是关于 x 轴的，起点为(0,0)。

定义区域运动

对于旋转和平移坐标系要定义移动区域，请在运动类型下菜单(如果你用滚动条向右滚动到旋转轴起点和方向，就是可见的了)中选择运动参考坐标系。然后在面板的扩展部分设定适当的参数。

要对移动或者滑移网格定义移动区域，在移动类型下拉列表中选择移动网格，然后在扩展面板中设定适当的参数。详情请参阅滑动网格。

对于包括线性、平移运动的流体（？？？原文是流体，按理说应该是固体）区域问题，通过设定 X, Y,和 Z 分量来指定平移速度。对于包括旋转运动的问题，在旋转速度中指定旋转速度。旋转轴的定义请参阅指定旋转轴一节。
关于在移动参考系中模拟流动的详细内容请参阅移动区域的流动一节。

定义辐射参数

如果你使用 DO 辐射模型，你可以用参加辐射选项指定固体区域是否参加辐射的计算。详情请参阅辐射边界条件一节。

多孔介质条件

多孔介质模型可以应用于很多问题，如通过充满介质的流动、通过过滤纸、穿孔圆盘、流量分配器以及管道堆的流动。当你使用这一模型时，你就定义了一个具有多孔介质的单元区域，而且流动的压力损失由多孔介质的动量方程中所输入的内容来决定。通过介质的热传导问题也可以得到描述，它服从介质和流体流动之间的热平衡假设，具体内容可以参考多孔介质中能量方程的处理一节。

多孔介质的一维化简模型，被称为多孔跳跃，可用于模拟具有已知速度/压降特征的薄膜。多孔跳跃模型应用于表面区域而不是单元区域，并且在尽可能的情况下被使用（而不是完全的多孔介质模型），这是因为它具有更好的鲁棒性，并具有更好的收敛性。详细内容请参阅多孔跳跃边界条件。

多孔介质模型的限制

如下面各节所述，多孔介质模型结合模型区域所具有的阻力的经验公式被定义为“多孔”。事实上多孔介质不过是在动量方程中具有了附加的动量损失而已。因此，下面模型的限制就可以很容易的理解了。

- 流体通过介质时不会加速，因为事实上出现的体积的阻塞并没有在模型中出现。这对于过渡流是有很大的影响的，因为它意味着 FLUENT 不会正确的描述通过介质的过渡时间。
- 多孔介质对于湍流的影响只是近似的。详细内容可以参阅湍流多孔介质的处理一节。

多孔介质的动量方程

多孔介质的动量方程具有附加的动量源项。源项由两部分组成，一部分是粘性损失项 (Darcy)，另一个是内部损失项：

$$S_i = \sum_{j=1}^{3} D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^{3} C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j$$

其中 S_i 是 i 向(x, y, or z)动量源项，D 和 C 是规定的矩阵。在多孔介质单元中，动量损失对于压力梯度有贡献，压降和流体速度（或速度方阵）成比例。
对于简单的均匀多孔介质：

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j$$

其中 a 是渗透性，C_2 时内部阻力因子，简单的指定 D 和 C 分别为对角阵 1/a 和 C_2 其它项为零。

FLUENT 还允许模拟的源项为速度的幂率：

$$S_i = C_0 |v_j|^{C_1} = C_0 |v|^{(C_1-1)} v_i$$

其中 C_0 和 C_1 为自定义经验系数。

注意：在幂律模型中，压降是各向同性的，C_0 的单位为国际标准单位。

多孔介质的 Darcy 定律

通过多孔介质的层流流动中，压降和速度成比例，常数 C_2 可以考虑为零。忽略对流加速以及扩散，多孔介质模型简化为 Darcy 定律：

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} v$$

在多孔介质区域三个坐标方向的压降为：

$$\Delta p_x = \sum_{j=1}^{3} \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x$$

$$\Delta p_y = \sum_{j=1}^{3} \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y$$

$$\Delta p_z = \sum_{j=1}^{3} \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z$$

其中 1/a_ij 为多孔介质动量方程 1 中矩阵 D 的元素 v_j 为三个方向上的分速度，D n_x、 D n_y、以及 D n_z 为三个方向上的介质厚度。

在这里介质厚度其实就是模型区域内的多孔区域的厚度。因此如果模型的厚度和实际厚度不同，你必须调节 1/a_ij 的输入。.

多孔介质的内部损失

在高速流动中，多孔介质动量方程 1 中的常数 C_2 提供了多孔介质内部损失的矫正。这一常数可以看成沿着流动方向每一单位长度的损失系数，因此允许压降指定为动压头的函数。

如果你模拟的是穿孔板或者管道堆，有时你可以消除渗透项而只是用内部损失项，从而得到下面的多孔介质简化方程：

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^{3} C_{2ij} \frac{1}{2} \rho v_j |v_j|$$

写成坐标形式为：

$$\Delta p_x = \sum_{j=1}^{3} C_{2xj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho v_j \left| v_j \right|$$

$$\Delta p_y = \sum_{j=1}^{3} C_{2yj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho v_j \left| v_j \right|$$

$$\Delta p_z = \sum_{j=1}^{3} C_{2zj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho v_j \left| v_j \right|$$

多孔介质中能量方程的处理

对于多孔介质流动，FLUENT 仍然解标准能量输运方程，只是修改了传导流量和过度项。在多孔介质中，传导流量使用有效传导系数，过渡项包括了介质固体区域的热惯量：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\phi \rho_f h_f \left(1-\phi\right) \rho_s h_s\right) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho_f u_i h_f\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) - \phi \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + \phi \frac{Dp}{Dt} +$$

$$\phi \tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \phi S_f^h + \left(1-\phi\right) S_s^h$$

其中：
h_f=流体的焓
h_s=固体介质的焓
f=介质的多孔性
k_eff=介质的有效热传导系数
S^h_f=流体焓的源项
S^h_s=固体焓的源项

多孔介质的有效传导率

多孔区域的有效热传导率 k_eff 是由流体的热传导率和固体的热传导率的体积平均值计算得到：

$$k_{eff} = \phi k_f + \left(1-\phi\right) k_s$$

其中：
f=介质的多孔性
k_f=流体状态热传导率（包括湍流的贡献 k_t）
k_s=固体介质热传导率
如果得不到简单的体积平均，可能是因为介质几何外形的影响。有效传导率可以用自定义函数来计算。然而，在所有的算例中，有效传导率被看成介质的各向同性性质。

多孔介质中的湍流处理

在多孔介质中，默认的情况下 FLUENT 会解湍流量的标准守恒防城。因此，在这种默认的方法中，介质中的湍流被这样处理：固体介质对湍流的生成和耗散速度没有影响。如果

介质的渗透性足够大，而且介质的几何尺度和湍流涡的尺度没有相互作用，这样的假设是合情合理的。但是在其它的一些例子中，你会压制了介质中湍流的影响。

如果你使用 k-e 模型或者 Spalart-Allmaras 模型，你如果设定湍流对粘性的贡献 m_t 为零，你可能会压制了湍流对介质的影响。当你选择这一选项时，FLUENT 会将入口湍流的性质传输到介质中，但是它对流动混合和动量的影响被忽略了。除此之外，在介质中湍流的生成也被设定为零。要实现这一解策略，请在流体面板中打开层流选项 。激活这个选项就意味着多孔介质中的 m_t 为零，湍流的生成也为零。如果去掉该选项（默认）则意味着多孔介质中的湍流会像大体积流体流动一样被计算。。

概述

模拟多孔介质流动时，对于问题设定需要的附加输入如下：

1. 定义多孔区域
2. 确定流过多孔区域的流体材料
3. 设定粘性系数（多孔介质动量方程 3 中的 1/a_ij）以及内部阻力系数（多孔介质动量方程 3 中的 C_2_ij），并定义应用它们的方向矢量。幂率模型的系数也可以选择指定。
4. 定义多孔介质包含的材料属性和多孔性
5. 设定多孔区域的固体部分的体积热生成速度（或任何其它源项，如质量、动量）（此项可选）。
6. 如果合适的话，限制多孔区域的湍流粘性。
7. 如果相关的话，指定旋转轴和/或区域运动。

在定义粘性和内部阻力系数中描述了决定阻力系数和/或渗透性的方法。如果你使用多孔动量源项的幂律近似，你需要输入多孔介质动量方程 5 中的 C_0 和 C_1 来取代阻力系数和流动方向。

在流体面板中（下图）你需要设定多孔介质的所有参数，该面板是从边界条件菜单中打开的（详细内容请参阅边界条件的设定一节）

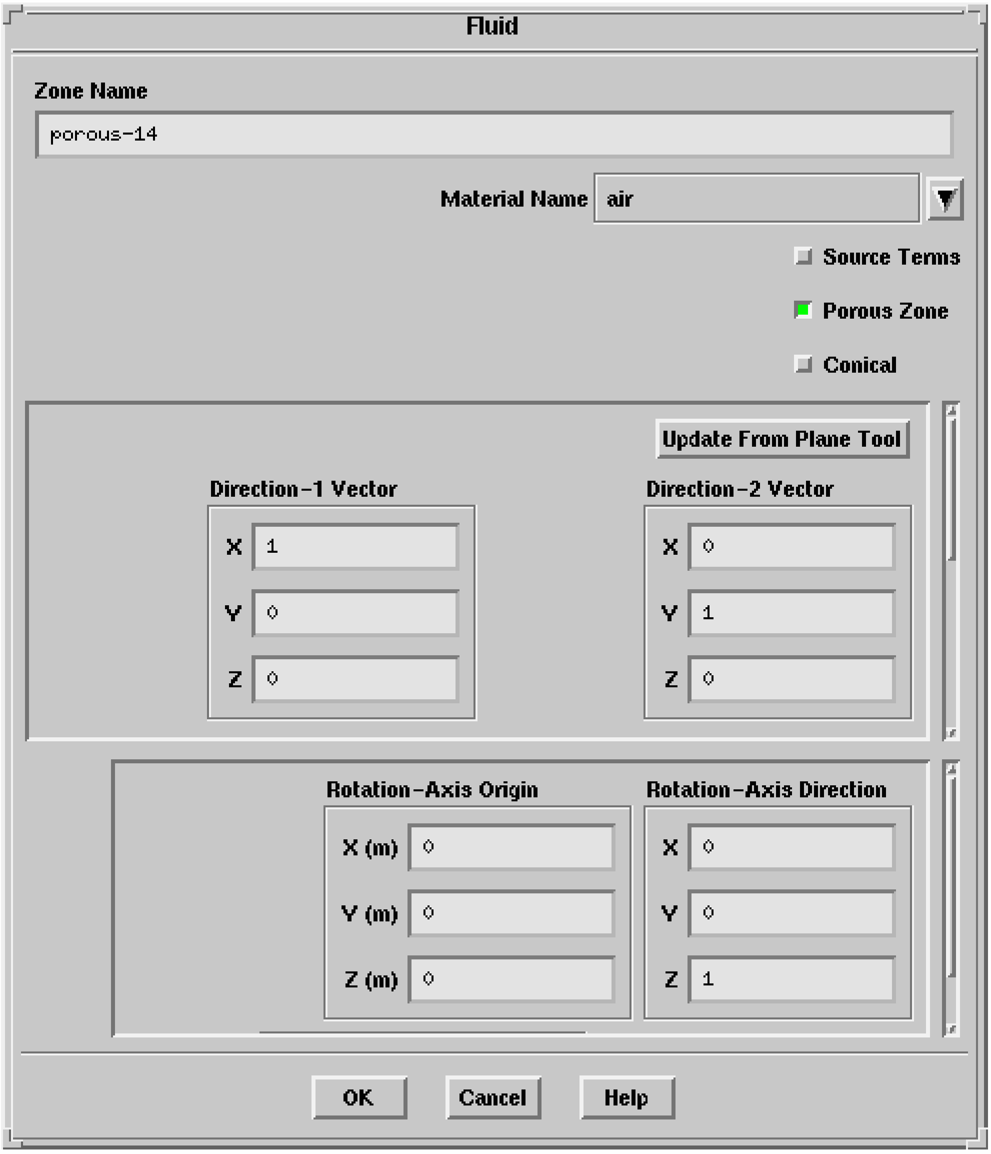


Figure 1:多孔区域的流体面板

定义多孔区域

正如定义边界条件概述中所提到的，多孔区域是作为特定类型的流体区域来模拟的。亚表明流体区域是多孔区域，请在流体面板中激活多孔区域选项。面板会自动扩展到多孔介质输入状态。

定义穿越多孔介质的流体

在材料名字下拉菜单中选择适当的流体就可以定义通过多孔介质的流体了。如果你模拟组分输运或者多相流，流体面板中就不会出现材料名字下拉菜单了。对于组分计算，所有流体和/或多孔区域的混合材料就是你在组分模型面板中指定的材料。对于多相流模型，所有流体和/或多孔区域的混合材料就是你在多相流模型面板中指定的材料。

定义粘性和内部阻力系数

粘性和内部阻力系数以相同的方式定义。使用笛卡尔坐标系定义系数的基本方法是在二维问题中定义一个方向矢量，在三维问题中定义两个方向矢量，然后在每个方向上指定粘性和/或阻力系数。在二维问题中第二个方向没有明确定义，它是垂直于指定的方向矢量和 z 向矢量所在的平面的。在三维问题中，第三个方向矢量是垂直于所指定的两个方向矢量所在平面的。对于三维问题，第二个方向矢量必须垂直于第一个方向矢量。如果第二个方向矢量指定失败，解算器会确保它们垂直而忽略在第一个方向上的第二个矢量的任何分量。所以你应该确保第一个方向指定正确。

在三维问题中也可能会使用圆锥（或圆柱）坐标系来定义系数，具体如下：
定义阻力系数的过程如下：

1. 定义方向矢量。
   - 使用笛卡尔坐标系，简单指定方向 1 矢量，如果是三维问题，指定方向 2 矢量。每一个方向都应该是从(0,0)或者(0,0,0)到指定的(X,Y)或(X,Y,Z)矢量。（如果方向不正确请按上面的方法解决）
   - 对于有些问题，多孔介质的主轴和区域的坐标轴不在一条直线上，你不必知道多孔介质先前的方向矢量。在这种情况下，三维中的平面工具或者二维中的线工具可以帮你确定这些方向矢量。
     1. 捕捉"Snap"平面工具（或者线工具）到多孔区域的边界。（请遵循使用面工具和线工具中的说明，它在已存在的表面上为工具初始化了位置）。
     2. 适当的旋转坐标轴直到它们和多孔介质区域成一条线。
     3. 当成一条线之后，在流体面板中点击从平面工具更新或者从线工具更新按钮。FLUENT 会自动将方向 1 矢量指向为工具的红（三维）或绿（二维）箭头所指的方向。
   - 要使用圆锥坐标系（比方说环状、锥状顾虑单元），请遵循下面步骤（这一选项只用于三维问题）：
     1. 打开圆锥选项
     2. 指定圆锥轴矢量和在锥轴上的点。圆锥轴矢量的方向将会是从(0,0,0)到指定的(X,Y,Z)方向的矢量。FLUENT 将会使用圆锥轴上的点将阻力转换到笛卡尔坐标系。
     3. 设定锥半角(锥轴和锥表面之间的角度，如下图)，使用柱坐标系，锥半角为 0.

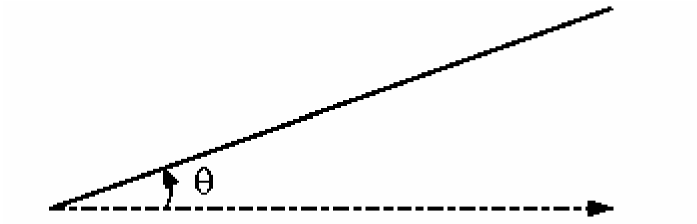


Figure 1:锥半角

   - 对于有些问题，锥形过滤单元的主轴和区域的坐标轴不在一条直线上，你不必知道锥轴先前的方向矢量以及锥轴上的点。在这种情况下，三维中的平面工具或者二维中的线工具可以帮你确定这些方向矢量。一种方法如下：
     1. 在点击捕捉到区域按钮之前，你可以在下拉菜单中选择垂直于锥轴矢量的轴过滤单元的边界区域。

2. 点击捕捉到区域按钮，FLUENT 会自动将平面工具捕捉到边界。它也会设定锥轴矢量和锥轴上的点（需注意的是你还要自己设定锥半角）。

- 另一种方法为：
  1. 捕捉"Snap"平面工具到多孔区域的边界。（请遵循使用面工具和线工具中的说明，它在已存在的表面上为工具初始化了位置）。
  2. 旋转和平移工具坐标轴，直到工具的红箭头指向锥的轴向。工具的起点在轴上。
  3. 当轴和工具的起点成一条线时，在流体面板中点击从平面工具更新按钮。FLUENT 会自动设定轴向矢量以及在轴上的点（注意：你还是要自己设定锥的半角）。

2. 在粘性阻力中指定每个方向的粘性阻力系数 1/a，在内部阻力中指定每一个方向上的内部阻力系数 C_2（你可能需要将滚动条向下滚动来查看这些输入）。如果你使用锥指定方法，方向 1 为锥轴方向，方向 2 为垂直于锥表面（对于圆柱就是径向）方向，方向 3 圆周（q）方向。

   在三维问题中可能有三种可能的系数，在二维问题中有两种：

   - 在各向同性算例中，所有方向上的阻力系数都是相等的（如海绵）。在各向同性算例中你必须将每个方向上的阻力系数设定为相等。
   - 在三维问题中只有两个方向上的系数相等，第三个方向上的阻力系数和前两个不等，或者在二维问题中两个方向上的系数不等，你必须准确的指定每一个方向上的系数。例如，如果你得多孔区域是由具有小洞的细管组成，细管平行于流动方向，流动会很容易的通过细管，但是流动在其它两个方向上（通过小洞）会很小。如果你有一个平的盘子垂直于流动方向，流动根本就不会穿过它而只在其它两个方向上。
   - 在三维问题中还有一种可能就是三个系数各不相同。例如，如果多孔区域是由不规则间隔的物体（如针脚）组成的平面，那么阻碍物之间的流动在每个方向上都不同。此时你就需要在每个方向上指定不同的系数（请注意指定各向同性系数时，多孔介质的解策略的注解）。

推导粘性和内部损失系数的方法在定义粘性和内部阻力系数一节中介绍。

当你使用多孔介质模型时，你必须记住 FLUENT 中的多孔单元是 100%打开的，而且你所指定 1/a_ij 和/或 C_2_ij 的值必须是基于这个假设的。然而，假如你知道通过真实装置压降和速度之间的的变化，它只是部分地对流动开放。下面的练习会告诉你如何对 FLUENT 模型计算适当的 C_2 值。

假定穿孔圆盘只有 25%对流动开放。已知通过圆盘的压降为 0.5。在圆盘内真实流体速度基础上，即通过%25 开放区域的的基础上，损失系数由下式定义的损失系数 K_L 为 0.5：

$$\Delta p = K_L \left(\frac{1}{2} \rho v_{25\%\ open}^2 \right)$$

要计算适当的 C_2 值，请注意在 FLUENT 模型中：

1. 通过穿孔圆盘的速度假定圆盘为 100%开放的。
2. 损失系数必须转化为多孔区域每个单位长度的动压头损失。

对于第一条，第一步是计算并调节损失因子 K_L'，它应该是在 100%开放区域的速度基础上的：

$$\Delta p = K_{L'}\left(\frac{1}{2}\rho v_{100\%open}^2\right)$$

或者注意对于相同的流速，v_25% open = 4 ×v_100% open,

$$K_L' = K_L \times \frac{v_{25\%open}^2}{v_{100\%open}^2} = 0.5 \times \left(\frac{4}{1}\right)^2 = 8$$

调节之后的损失系数为 8。对于第二条，你必须将它转换为穿孔圆盘每个单位厚度的损失系数。假定圆盘的厚度为 1.0 mm。内部损失系数为（国际标准单位）：

$$C_2 = \frac{K_{L'}}{thickness} = \frac{8}{10^{-3}} = 8000m^{-1}$$

注意，对于各向异性介质，这些信息必须分别从每一个坐标方向上计算。

第二个例子，考虑模拟充满介质的流动。在湍流流动中，充满介质的流动用渗透性和内部损失系数来模拟。推导适当常数的方法包括了 Ergun 方程[49]的使用，对于在很大范围雷诺数内和许多类型的充满形式，有一个半经验的关系式：

$$\nabla p = \frac{150\mu}{D_p^2}\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}v + \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{D_p\varepsilon^3}Vv$$

当模拟充满介质的层流流动时，上面方程中的第二项可能是个小量，从而得到 Blake-Kozeny 方程[49]：

$$\nabla p = \frac{150\mu}{D_p^2}\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}v$$

在这些方程中，m 是粘性，D_p 是平均粒子直径，e 空间所占的分数（即空间的体积除以总体积）。比较多孔介质中 Darcy 定律的方程 1 和内部损失系数为 9 的方程 1，则每一方向上的渗透性和内部损失系数定义为：

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150}\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D_p}\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

第三个例子我们会考虑 Van Winkle 等人[146]，[121]的方程，并表明如何通过具有方孔圆盘的多孔介质输入来计算压力损失。

作者所声明的应用在通过在等边三角形上的方洞圆盘的湍流中的表达式为：

$$\dot{m} = CA\sqrt{(2\rho\Delta\rho)/\left(1-(A_f/A_P)^2\right)}$$

其中：

m(dot)=通过圆盘的质量流速

A_f=剩下的面积或者洞的总面积

A_p=圆盘的面积（固体和洞)

C=对于不同 D/t 的不同雷诺数范围被列成不同的表的系数
D/t=洞的直径和圆盘厚度的比例
对于 t/D > 1.6 和 Re > 4000，系数 C 近似为 0.98，其中雷诺数是基于洞的直径与速度的
使用下式整理方程 17：

$$\dot{m} = \rho v A_p$$

除以圆盘的厚度 D x = t 有：

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right)\frac{1}{C^2}\frac{\left(A_p/A_f\right)^2 - 1}{t}$$

其中 v 是表面速度而不是洞内的速度。与多孔介质内部损失系数中的方程 1 比较可以看出，对于垂直于圆盘方向，常数 C_2 可由下式计算：

$$C_2 = \frac{1}{C^2}\frac{\left(A_p/A_f\right)^2 - 1}{t}$$

考虑通过由随机方向的纤维或者玻璃材料组成的垫子或者过滤器的层流。对于可以二选一的方程 Blake-Kozeny(方程 11)，我们可能会选择将实验数据列成表。很多类型的纤维都由这一类相关的数据[70]。

固体体积分数 f	玻璃丝织品的无量纲渗透性 Q
0.262	0.25
0.258	0.26
0.221	0.40
0.218	0.41
0.172	0.80

其中 Q $=\alpha/a^2$，a 为纤维直径。使用多孔介质的 Darcy 定律中的方程 1 可以很容易从给定的纤维直径和体积分数种计算出 α 。

使用幂律模型

对于多孔介质动量源项（多孔介质动量方程中的方程 5），如果你使用幂律模型近似，你只要在流体面板的幂律模型中输入系数 C_0 和 C_1 就可以了。如果 C_0 或 C_1 为非零值，解算器会忽略面板中除了多孔介质幂律模型之外的所有输入。

定义热传导

如果你选择在多孔介质中模拟热传导，你必须指定多孔介质中的材料以及多孔性。要定义多孔介质的材料，向下拉流体面板中阻力输入下面的滚动条，然后在多孔热传导的固体材料下拉列表中选中适当的固体。

然后在多孔热传导下设定多孔性。多孔性 f 是多孔介质中流体的体积分数（即介质的开放体积分数）。多孔性用于介质中的热传导预测，处理方法请参阅多孔介质能量方程的处理一节。它还对介质中的反应源项和体力的计算有影响。这个源项和介质中流体的体积成比例。如果你想要模拟完全开放的介质（固体介质没有影响），你应该设定多孔性为 1.0。当多

孔性为 1.0 时，介质的固体部分对于热传导和（或）热源项/反应源项没有影响。注意：多孔性永远不会影响介质中的流体速度，这已经在多孔介质的动量方程一节中介绍了。不管你将多孔性设定为何值，，FLUENT 所预测的速度都是介质中的表面速度。

定义源项

如果你想在多孔流动的能量方程中包括热的影响，请激活源项选项并设定非零的能量源项。FLUENT 会计算多孔区域所生成的能量，该能量为能量源项值乘以组成多孔区域的单元所有体积值。你也可以定义质量、动量、湍流、组分或者其它标量的源项，详细内容请参阅、质量、动量、能量和其它源项的定义。

在多孔区域内压制湍流源项

如多孔介质的湍流处理中所讨论的，湍流在多孔介质中的计算和大量（bulk）流体流动是一样的。如果你使用 k-e 模型或者 Spalart-Allmaras 模型，你想要压制湍流在多孔区域的影响可以打开流体区域面板中的层流区域选项（从而使得多孔区域的湍流生成为零）。

指定旋转轴并定义区域运动

旋转轴和区域运动的输入和标准流体区域的输入是相同的，详细情况可以参阅流体区域的输入一节。

多孔介质的解策略

一般说来，在模拟多孔介质时，你可以使用标准的解算步骤以及解参数的设置。然而你会发现如果多孔区域在流动方向上压降相当大（比如：渗透性 a 很低或者内部因子 C_2 很大）的话，解的收敛速度就会变慢。这就表明由于动量源项中出现了多孔介质的压降（方程的矩阵不再是对角占优了），收敛性问题就出现了。解决多孔介质区域收敛性差最好的补救办法就是对于通过介质的流向压降有一个很好初始预测。猜测的办法之一就是，在介质流体单元的上游或者下游补偿一个压力值，详细内容请参阅所选单元的补偿值一节。必须记住的是，当补偿压力时，你所输入的压力可以定义为解算器所使用的 gauge 压力（即在操作条件面板中定义的相对于操作压力的压力）。

另一个处理收敛性差的方法是临时取消多孔介质模型（在流体面板中关闭多孔区域）然后获取一个不受多孔区域影响的初始流场。取消多孔区域后，FLUENT 会将多孔区域处理为流体区域并按相应的流体区域来计算。一旦获取了初始解，或者计算很容易收敛，你就可以激活多孔模型继续计算包含多孔区域的流场(对于大阻力多孔介质不推荐使用该方法)。

对于高度各向异性的多孔介质，有时会造成收敛性的麻烦。对于这些问题你可以将多孔介质的各向异性系数（1/a_ij 和 C_2_i,j）限制在二阶或者三阶的量级。即使在某一方向上介质的阻力为无穷大，你也不需要将它设定超过初始流动方向上的 1000 倍。

多孔介质的后处理

可以通过检查速度分量和压力值来确定多孔区域对于流场的影响。你可能对下列变量或函数的图形（XY 图，等值线图或者矢量图）或者文档报告感兴趣：

- X,Y,Z 速度（在速度类别中）

- 静压（在压力类别中）

这些变量会在后处理面板的变量选择下拉菜单制定类别中出现。

需要注意的是多孔区域的热报告不影响固体介质的属性。所报告的多孔区域内的热容、传导率以及焓是流体的属性不包括固体介质的影响。

排气扇边界条件

排气扇模型是集总模型，可用于确定具有已知特征的排气扇对于大流域流场的影响。排气扇边界类型允许你输入控制通过排气扇单元头部（压升）和流动速率（速度）之间关系的经验曲线。你也可以制定排气扇旋转速度的径向和切向分量。排气扇模型并精确模拟经过排气扇叶片的详细流动。它所预测的是通过排气扇的流量。排气扇的使用可能和其它流动源项关联，或作为模拟中流动的唯一源项。在后面的算例中，系统的流动速度由系统的损失和排气扇曲线之间的相互平衡决定。

FLUENT 还提供了与用户自定义模型之间的连接，这个模型在计算时更新了压力跳跃函数。该功能在自定义排气扇模型一节介绍。

排气扇方程

模拟通过排气扇的压升

在 FLUENT 的排气扇模型中，排气扇被看成无限薄，通过排气扇的不连续压升被指定为通过排气扇速度的函数。它们之间的关系可能是常数，多项式、分段线性函数或者分段多项式函数，也可以是自定义函数。

多于多项式情况，关系式为：

$$\Delta p = \sum_{n=1}^{N} f_n v^{n-1}$$

其中 D p 为压力升高（单位：Pa），f_n 为压力跳跃多项式系数，v 垂直于排气扇的当地流体速度。速度 v 既可以是正也可以是负。你必须正确的模拟排气扇以保证从排气扇流过之后流体有个压力升高的现象。

对于排气扇区域内所有表面，你可以选择使用垂直于排气扇的质量平均速度来确定单独的压力跳跃值。

模拟排气扇漩涡速度

对于三维问题，对流的切向何径向速度值可以加到排气扇表面来产生涡流。这些速度可以指定为到排气扇中心的径向距离的函数。它们之间的关系可以是常数、多项式函数或者自定义函数。注意：所有涡流速度输入都使用国际单位。

对于多项式函数，切向何径向速度公式为：

$$U_\theta = \sum_{n=-1}^{N} f_n v^n; -1 \le N \le 6$$

$$U_r = \sum_{n=-1}^{N} g_n v^n; -1 \le N \le 6$$

其中 U_q 和 U_r 分别为排气扇表面的切向和径向速度，单位为。m/s，f_n 和 g_n 是切向和径向速度的多项式系数，r 为到排气扇中心的距离。

排气扇的用户输入

概述

一旦排气扇区域被确定（在边界条件面板），你需要在排气扇面板（下图）中设定所有的模型输入。该面板是从边界条件菜单中打开的，详细内容清参阅边界条件的设定一节。

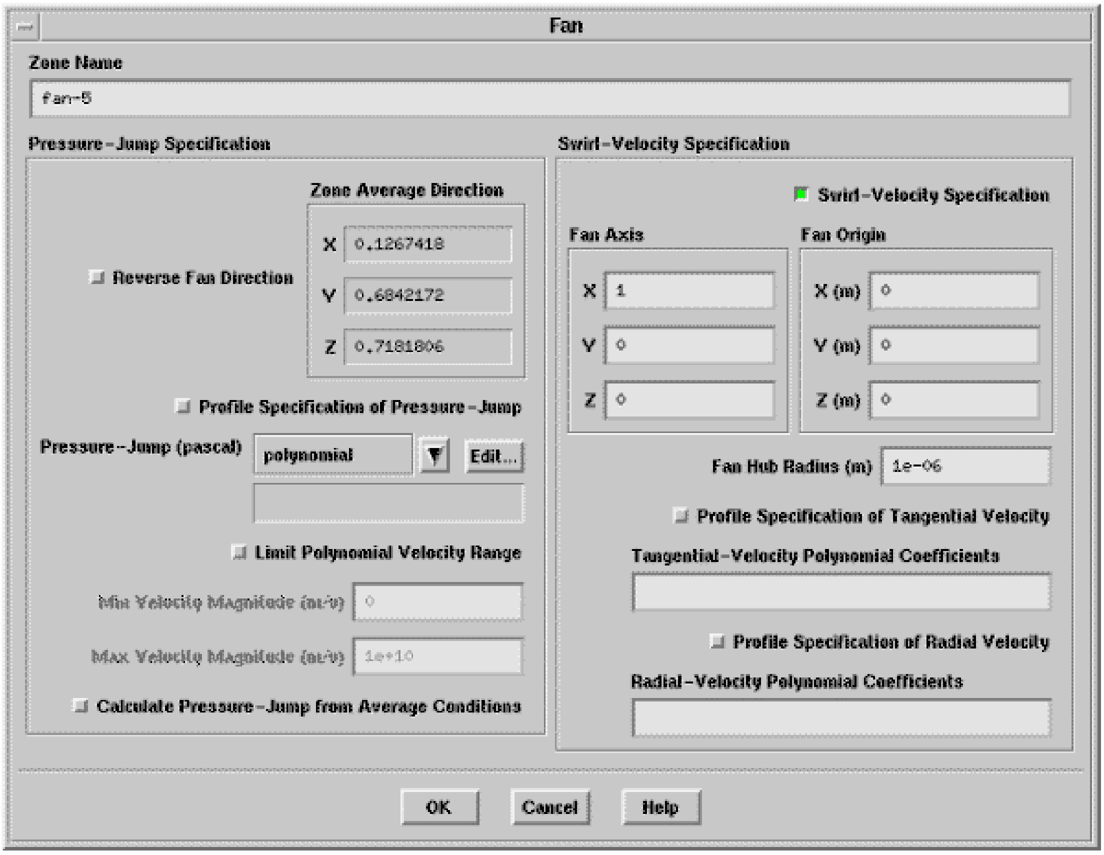


Figure 1: 排气扇面板

对于排气扇，需要输入如下：

1. 确定排气扇区域
2. 定义通过排气扇的压力跳跃
3. 为排气扇定义离散相边界条件（对于离散相计算）
4. 需要的话，定义漩涡速度（只用于三维）

确定排气扇区域

因为排气扇被定义为无限薄，所以它必须被模拟为单元之间的界面而不是单元区域。因此排气扇区域是内部表面区域类型（其中表面是是二维中的线段或者三维中的三角形/四

边形）。当你将网格读入到 FLUENT 中时，如果排气扇区域被确定为内部区域，请使用边界条件（见改变边界区域类型）将适当的内部区域改变为排气扇区域。菜单：Define/Boundary Conditions...。内部区域改变为排气扇区域后，你可以打开排气扇面板并指定压力跳跃，以及（可选）漩涡速度。

定义压力跳跃

要定义压力跳跃，你需要指定速度的多项式函数、分段线性函数、分段多项式函数或者常数，也可以是自定义函数。你还应该检查区域平均方向矢量，保证流过排气扇有个压力升高。由解算器计算的区域平均方向是排气扇区域的表面平均方向矢量。如果这个方向指向和排气扇吹的方向一致就不用选择排气扇翻转方向了，否则选择排气扇翻转方向。

对于压力跳跃，请遵循下面的步骤定义多项式函数、分段线性函数、分段多项式函数：

1. 检查排气扇面板，其中的压力跳跃轮廓指定选项是关闭的。
2. 在压力跳跃右边的下拉菜单中选择多项式、分段线性或者分段多项式（如果所所要选择的类型已被选中，你就可以点击编辑按钮打开定义函数的面板了）。
3. 在定义压力跳跃函数的面板中（如下图）输入适当的数值。这些轮廓输入面板和温度相关属性的轮廓输入面板用法相同。请参阅使用温度相关函数定义属性来查看如何使用它。

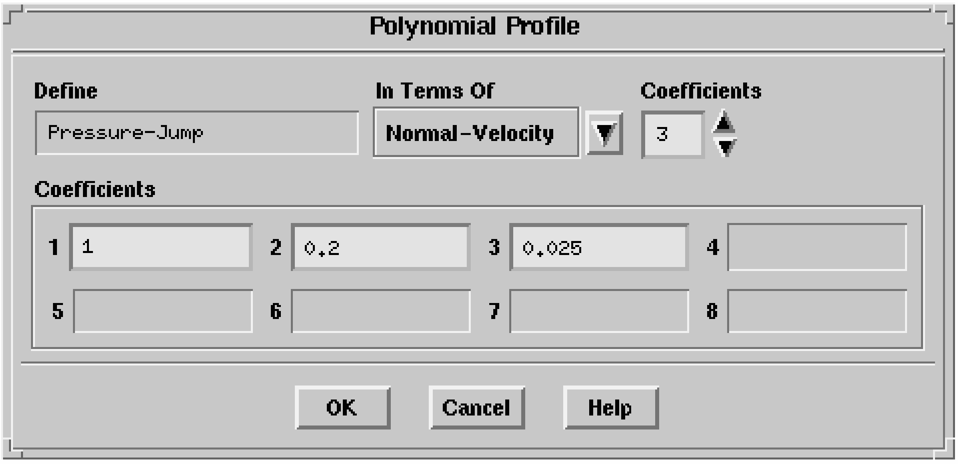


Figure 1: 压力跳跃定义的多项式轮廓面板

4. 设定下面所述的任何可选参数（此步可选）。

当你用这些函数的任何类型来定义压力跳跃时，你可以限定计算压力跳跃的速度值的最大和最小极限。打开多项式速度范围极限选项就可以设定速度范围的最大最小值了。如果计算的法向速度范围超出了你所指定的最大/最小速度范围，那么解算器就会用极限值来替换它。

你也可以选用垂直于风扇的质量平均速度来确定风扇区域内所有表面的单一的压力跳跃值。打开从平均条件计算压力跳跃可以激活这个选项。

要定义常数压力跳跃，请遵循如下步骤：

1. 在排气扇面板中打开指定压力跳跃轮廓选项。
2. 在压力跳跃右边的下拉菜单中选择常数。
3. 输入压力跳跃场中的 D p 值。

如果更方便的话，你也可以使用如下步骤：

1. 打开压力跳跃的轮廓指定选项。
2. 在压力跳跃轮廓下面的下拉菜单中选择常数，然后输入压力跳跃轮廓场的 D p 值。

对于自定义压力跳跃函数或者边界轮廓中定义的函数，请遵循如下步骤：

1. 打开压力跳跃的轮廓指定选项。
2. 在压力跳跃轮廓下面的下拉菜单中选择适当的函数，然后输入压力跳跃轮廓场的 D p 值。

关于自定义函数的信息请参阅自定义函数一节，关于边界轮廓文件的信息请参阅边界轮廓一节。

下面的例子告诉了我们如何确定压力跳跃的函数。考虑简单的二维管流（如图 2）。进入长 2.0m 宽 0.4m 的导管的常密度空气的速度为 15 m/s。管的中心是个排气扇。

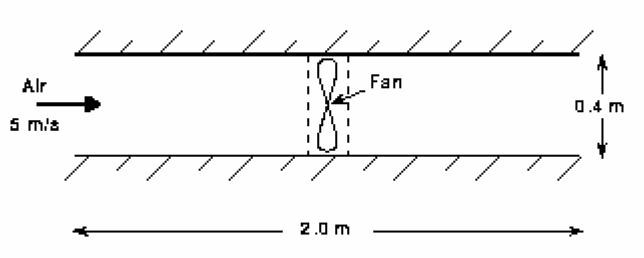


Figure 2: 定位于二维导管的排气扇

当风扇的转速是 2000rpm 时，假定风扇的特征如下：

Q (m^3/s)D p (Pa)

250.0

20175

15350

10525

5700

0875

其中 Q 时通过风扇的流动，D p 时通过风扇的压升。在本例中，风扇的特征为压力升高和速度呈线性关系。要将这些特征转换为压力和速度的关系，必须知道风扇的截面信息。在本例中，假定导管是 1.0 米深，面积为 0.4 平方米。相应的速度值如下：

v (m/s)D p (Pa)

62.50.0

50.0175

37.5350

25.0525

12.5700

0875

下面的对于一条线的方程是关系的多项式形式：

$$\Delta p = 875 - 14v$$

为风扇定义离散相边界条件

如果你是模拟粒子的离散相问题，你可以设定粒子在风扇处的轨迹。关于边界条件的设定清参阅离散相边界条件一节。

定义排气扇旋转速度

如果你想在风扇表面设定切向和径向速度来产生三维问题中的涡流，步骤如下：

1. 在排气扇面板打开漩涡速度指定选项。
2. 定义轴的起始点（风扇的起始点）和方向矢量（风扇的旋转轴）来指定风扇的旋转轴。
3. 设定风扇旋转轴的半径值。默认为1×10^6以避免多项式中出现除零问题。
4. 设定切向和径向速度为半径的多项式函数，常数值或者自定义函数。

注意：涡流的速度输入必须是国际标准单位。

要定义切向和径向速度的多项式函数，步骤如下：

1. 在排气扇面板中，检查切向速度的轮廓指定或者径向速度的轮廓指定选项是关闭的。
2. 输入模拟排气扇涡流中的方程 1 的系数 f_n，或者在切向或径向速度多项式系数框中模拟风扇漩涡速度的方程 3 的 g_n。首先输入 f_-1 然后是 f_0 等。记住用空格符将每一个系数分开，第一个系数是(1/r)。

要定义常数切向或者径向速度，步骤如下：

1. 在排气扇面板中打开切向速度或者径向速度的轮廓指定选项。
2. 在切向或者径向速度轮廓中选择常数。
3. 在切向或者径向速度轮廓中输入相应的 U_q 或者 U_r 值。

如果更方便的话，你可以遵照如下步骤：

1. 在排气扇面板中打开切向速度或者径向速度轮廓指定选项。
2. 在切向或者径向多项式速度系数中输入 U_q 或者 U_r 的值。

对于自定义切向或者径向速度函数或者包括边界轮廓的文件的函数，步骤如下：

1. 打开切向速度或者径向速度的轮廓指定选项。
2. 在切向或者径向速度轮廓下拉列表中选择适当的函数。

如果你是自定义函数的信息，请参阅自定义函数一节，关于边界轮廓的信息请参阅边界轮廓文件一节。

排气扇的后处理

报告通过排气扇的压升

你可以使用表面整合面板报告通过排气扇的压升，具体请参阅表面整合一节。共有两步：

1. 在风扇区域的每一边创建一个界面。使用变形界面面板(参阅变形表面一节)分别向上和向下稍微平移一下风扇区域，从而创建两个新的界面。
2. 在界面整合面板中，报告上游和下游界面的平均整合压力（使用平均选项）。这样你就可以计算通过风扇的压力变化了。

图形绘制

图形绘制报告对风扇所感兴趣的是：

1. 静压和静温的轮廓或等值线图。

2. 静压和静温的 XY 图与位置的比较。

图形和可视化一章解释了如何产生数据的图形显示。

注意：生成这些图形时要保证关闭所有节点值的显示，以便于你在风扇的每一个边可以看到不同的值。(如果你显示节点值，风扇两边的单元值会被取平均来获取节点值，这样你就看不到通过风扇的压力跳跃和其它现象了。

辐射边界条件

FLUENT 中有热交换单元（如散热器和冷凝器）的集总参数模型。散热器边界类型允许你指定压降和热传导系数为垂直于散热器的速度的函数。关于 FLUENT 所提供的热交换模型的更多详细信息，请参阅热交换模型一节。

散热器方程

模拟通过散热器的压力损失

FLUENT 中所模拟的散热器被认为是无限薄，通过散热器的压降假定与流体的动压头成比例，并具有你所提供的损失系数的经验公式。也就是说，压降 D p 与通过散热器的法向速度 v 分量的关系为：

$$\Delta p = k_L \frac{1}{2} \rho v^2$$

其中 r 为流体密度，k_L 为无量纲损失系数，它可以指定为多项式函数、分段线性函数或者分段多项式函数。

对于多项式函数，有下式：

$$k_L = \sum_{n=1}^{N} r_n v^{n-1}$$

其中 r_n 为多项式系数，v 为垂直于散热器的当地流体速度的大小。

模拟通过散热器的热传导

从散热器到周围流体的热流量为：

$$q = h\left(T_{HX} - T_{exit}\right)$$

其中 q 为热流量，T_HX 为热交换器（散热器）温度，T_exit 为流出流体的温度。对流热传导系数 h 可以指定为常数、多项式函数、分段线性函数或者分段多项式函数。

对于多项式，关系式的形式如下：

$$h = \sum_{n=0}^{N} h_n v^n ; 0 \le N \le 7$$

h_n 为多项式系数，v 为垂直于散热器的当地流体速度的大小（单位 m/s）。

实际的热流量（q）或者热传导系数和散热器温度（h, T_HX）都可以指定。q（可以是

输入值也可以是用方程 1 计算出的值）为热流在整个散热器表面的积分。

要模拟散热器的热行为，你必须提供热传导系数 h 的详细表达式，它是通过散热器的流体速度 v。要获取这个表达式考虑热平衡方程：

$$q = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{A} = h\left(T_{HX} - T_{exit}\right)$$

其中

q=热流量(W/m^2)

m(dot)=流体质量流速(kg/s)

c_p=指定的流体比热容(J/kg-K)

h=经验热传导系数(W/m^2K)

T_exit=出口流体温度(K)

T_HX=热交换器(如水边)温度(K)

A=热交换器前缘面积(m^2)

方程 5 可以写成：

$$q = \frac{\dot{m} c_p \left(T_{exit} - T_{inlet}\right)}{A} = h\left(T_{HX} - T_{exit}\right)$$

因此，热传导系数 h 可以计算为：

$$h = \frac{\dot{m} c_p \left(T_{exit} - T_{inlet}\right)}{A\left(T_{HX} - T_{exit}\right)}$$

或者根据流体速度：

$$h = \frac{\rho v c_p \left(T_{exit} - T_{inlet}\right)}{\left(T_{HX} - T_{exit}\right)}$$

散热器需要的输入

概述

一旦在边界条件面板中确定了散热器区域，你就该在散热器面板（下图）中为散热器模型的各项设定输入相应内容了。该面板是从边界条件菜单中打开的，详细情况请参阅设定边界条件一节。

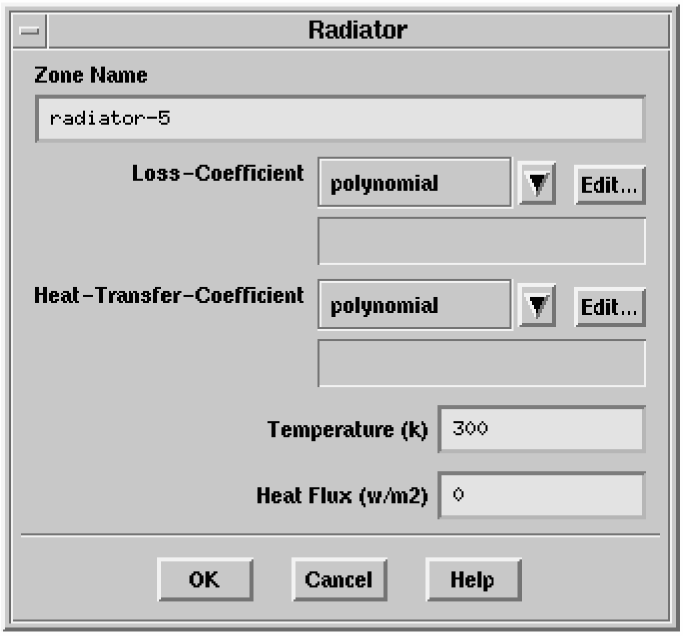


Figure 1:散热器面板

散热器需要输入如下：

1. 确定散热器区域
2. 定义压力损失系数
3. 定义热流量或者热传导系数和散热器温度
4. 为散热器定义离散相边界条件（对于离散相计算）

确定散热器区域

因为散热器被定义为无限薄，所以它必须被模拟为单元之间的界面而不是单元区域。因此排气扇区域是内部表面区域类型（其中表面是是二维中的线段或者三维中的三角形/四边形）。当你将网格读入到 FLUENT 中时，如果散热器区域被确定为内部区域，请使用边界条件（见改变边界区域类型）将适当的内部区域改变为散热器区域。菜单：Define/Boundary Conditions...。内部区域改变为散热器区域后，你可以打开散热器面板并指定损失系数，以及热流量的信息。

定义压力损失系数函数

要定义压力损失系数 k_L，你可以指定速度的多项式函数、分段线性函数、分段多项式函数或者常数。

遵循下面的步骤来设压力损失系数的多项式函数、分段线性函数或分段多项式函数：

1. 在损失系数右边的下拉列表中选择多项式函数、分段线性函数或分段多项式函数（如果你所需要的函数类型已经选中，点击编辑按钮打开定义函数的面板。
2. 在定义损失系数函数的面板中（如下图）输入适当的数值。这些轮廓输入面板和温度相关属性的轮廓输入面板用法相同。请参阅使用温度相关函数定义属性来查看如何使用它。

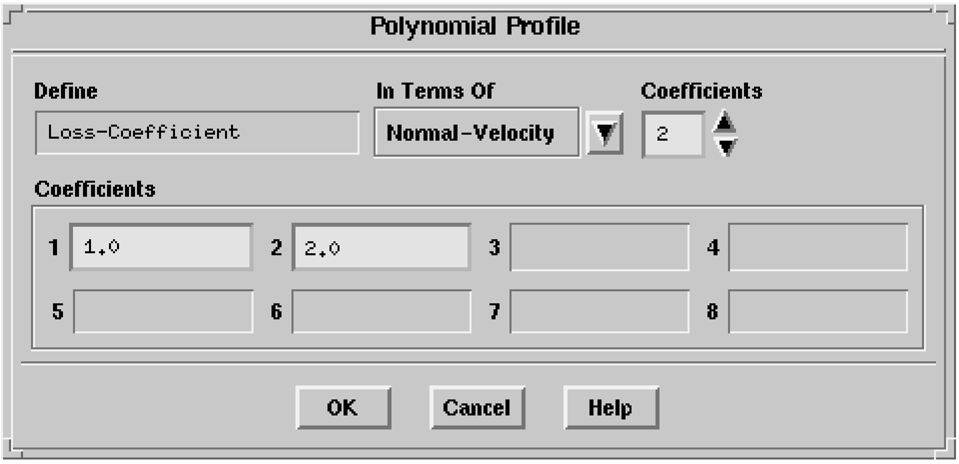


Figure 1:损失系数定义的多项式轮廓面板

设定常数损失系数步骤如下：

4. 在损失系数右边的下拉菜单中选择常数。
5. 在损失系数中输入 k_L 的值。

下面的例子告诉你如何确定损失系数函数。考虑通过水冷却散热器的简单的空气二维管流，如下图：

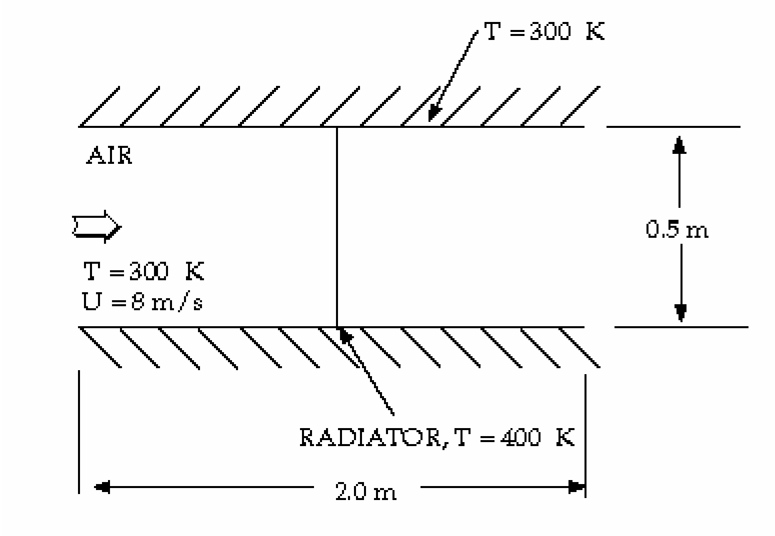


Figure 2:散热器的简单管流 r

首先必须经验地知道散热器的特征。在这个例子中，所模拟的散热器的测试数据如下表，水边的流速为 7 kg/min，入口水的温度为 400.0 K。要计算这个损失系数，创建一个动压头（(1/2)r v^2）的表格是很有帮助的，动压头是压降 D p 以及这两个值的比 k_L（在通过散热器损失系数的模拟一节中的方程 1 中）的函数。 (图 2 中定义的空气密度为 1.0 kg/m^3。) 简化的数据在表二中。

表一：空气边散热器数据

VelocityInlet TempExit TempPressure Drop

(m/s)(K)(K)(Pa)

5.0300.0330.075.0

10.0300.0322.5250.0

15.0300.0320.0450.0

表二：简化的散热器数据
v (m/s)(1/2)r v^2 (Pa)D p (Pa)k_L
5.012.575.06.0
10.050.0250.05.0
15.0112.5450.04.0
损失系数是速度的线性函数，随着速度的增加而减少，关系式的形式为：

$$k_L = 7.0 - 0.2v$$

其中 v 在这里是通过散热器的绝对速度值。

定义热流量参数

正如散热器方程所提到的，你可以在热流量框中定义真实的热流量（q）也可以设定热传导系数和辐射温度（h, T_HX）所有的输入都在散热器面板中。

要定义热流量，指定温度为 0，然后设定热流量为常数值。

要设定温度，在温度框中输入 T_HX 的值。要定义热传导系数，你可以指定速度的多项式函数、分段线性函数或分段多项式函数或者常数值。

指定速度的多项式函数、分段线性函数或分段多项式函数或者常数值来定义热传导系数，步骤如下：

1. 在热传导系数右边的下拉菜单中选择多项式、分段线性或分段多项式。（如果你所要使用的函数类型已经被选中，你可以点击编辑按钮打开你所定义的函数的面板）。
2. 在热传导系数函数定义的面板中输入适当的值。这些轮廓输入面板和温度相关属性的轮廓输入面板用法相同。请参阅使用温度相关函数定义属性来查看如何使用它。

要定义常数热传导系数，步骤如下：

1. 在热传导系数下拉列表中选择常数。
2. 在热传导系数框中输入 h 的值。

下面的例子告诉你如何设定热传导系数。考虑通过水冷却散热器的简单的空气二维管流。

在定义压力损失系数的表一的数据以及空气密度值（1.0 kg/m^3）和指定的热（1000 J/kg-K)可用于获取下面的的值，它们可用于计算热传导系数 h：
Velocityh
(m/s)(W/m^2K)
5.02142.9
10.02903.2
15.03750.0
热传导系数符合速度的二阶多项式关系（与上面的点相符），形式如下：

$$h = 1469.1 + 126.11 + 1.73v^2$$

其中 v 在这里是通过散热器的绝对速度值。

为散热器定义离散相边界条件

如果你模拟粒子的离散相，你可以在散热器中设定粒子的轨迹，详细内容请参阅离散相边界条件的设定一节。

散热器的后处理

报告散热器的压降

你可以使用表面整合面板来报告通过散热器的压降，具体请参阅表面整合一节。共分两步来处理：

1. 在散热器区域的每一边创建一个界面。使用变形界面面板(参阅变形表面一节)分别向上和向下稍微平移一下风扇区域，从而创建两个新的界面。
2. 在界面整合面板中，报告上游和下游界面的平均整合静压（使用平均选项）。这样你就可以计算通过风扇的压力变化了。

要检查这个数值和通过散热器压力损失模拟中的方程 1 的预期值比较的话，你可以使用界面整合面板报告通过散热器的平均法向速度。（如果散热器和 x，y 或 z 轴不在一条线上，你需要使用自定义流场函数计算器来为垂直于散热器的速度生成一个函数。一旦你有了平均法向速度，你就可以使用模拟通过散热器压力损失中的方程 3 来确定损失系数，然后用模拟通过散热器压力损失中的方程 1 来计算所预期的压力损失。

报告散热器中的热传导

要确定通过散热器的温度，请参阅报告散热器压降产生散热器上游下游的界面的大致步骤。然后是用界面整合面板（关于压降报告的）报告每一个表面上的平均静温。然后你就可以计算通过散热器的温度了。

图形显示

你所感兴趣的散热器的图形报告有：

- 静压和静温的轮廓或等值线图
- 静压和静温的 XY 图与位置的比较

图形和可视化一章解释了如何生成数据显示图形。

注意：生成这些图形时要保证关闭所有节点值的显示，以便于你在散热器的每一个边可以看到不同的值。（如果你显示节点值，散热器两边的单元值会被取平均来获取节点值，这样你就看不到通过散热器的压力跳跃和其它现象了。

多孔跳跃边界条件

多孔跳跃条件用于模拟已知速度/压降特征的薄膜。它本质上是单元区域的多孔介质模型的一维简化。应用的实例有：模拟通过筛子和过滤器的压降，不考虑热传导影响的散热器模拟。我们应该尽可能的使用这一简化模型（取代完全的多孔介质模型），因为它具有很好的鲁棒性（robust）和收敛性。

薄膜介质是具有有限厚度的，通过它的压力变化定义为 Darcy 定律和附加内部损失项的结合：

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v + C_2\frac{1}{2}\rho v^2\right)\Delta m$$

其中，m 是层流流体粘性，a 是介质的渗透性，C_2 为压力跳跃系数，v 是垂直于介质表面的速度分量，D m 为薄膜的厚度。C_2 的适当值可以用多孔介质用户输入中所介绍的技巧来求得。

多孔跳跃模型的用户输入

一旦在边界条件面板中指定了多孔跳跃区域，你就需要在多孔跳跃面板中（如下图）设定所有的模型输入。这个面板是从边界条件菜单中打开的，详细方法请参阅设定边界条件一节。

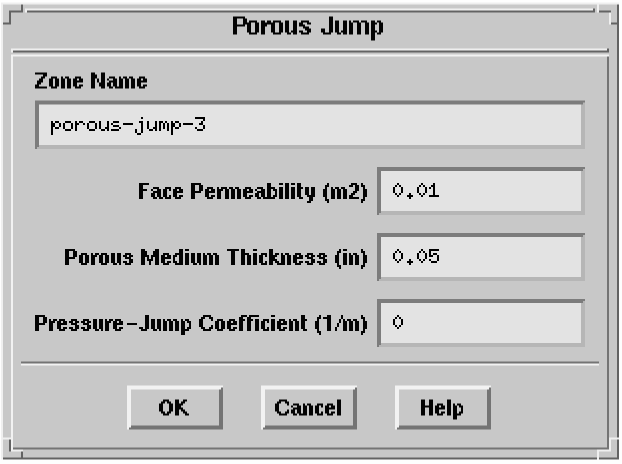


Figure 1: 多孔跳跃面板

多孔跳跃模型需要输入如下：

1. 确定多孔跳跃区域
2. 设定介质的表面渗透性（多孔跳跃边界条件的方程 1）
3. 设定多孔介质厚度（D m）。
4. 设定压力跳跃系数（C_2）。注意：此项输入不管你是用什么单位系统，所输入的值都要是国际标准单位对应的值。
5. 为多孔跳跃定义离散相边界条件（对于离散相计算）

多孔介质的一维化简模型，被称为多孔跳跃，可用于模拟具有已知速度/压降特征的薄膜。多孔跳跃模型应用于表面区域而不是单元区域，因此多孔跳跃区域是内部表面区域类型（表面在二维中是线段，在三维中是三角形或四边形）。如果多孔跳跃区域没有被确认（也就是说它被确认为其它内部表面区域类型）或者读入网格时为默认，你就需要使用边界条件来将适当的表面区域改为多孔跳跃区域。菜单为：Define/Boundary Conditions...。

改变区域类型的程序在改变区域类型一节中介绍了，一旦区域被改成多孔跳跃区域，你就可以打开多孔跳跃面板（见设定边界条件一节）来指定上面所列的所有参数。

如果你模拟粒子的离散项模型，你可以在多孔跳跃区域设定粒子的轨迹。详细内容请参

阅离散相边界条件的设定一节。

多孔跳跃的后处理

和多孔介质的后处理一样，请参阅相关内容。

热交换模型

气候控制和工程冷却系统是典型的包含热交换器核心的例子。然而，对于大多数工程问题， 要模拟个别的散热片或者热交换核心的管道是不切合实际的。从原则上讲，热交换核心增加了热量并对空气流引入了压降。在 FLUENT 中，集总参数模型用于说明压力损失和冷却剂热损(失)耗。热交换模型的冷却剂模型限制为单相。该模型用于计算冷却剂对于固定热损耗的入口温度或者对于固定的冷却剂入口温度的总的热损耗。

热交换模型概述

对于典型的热交换核心，冷却剂温度在冷却剂流动方向上是分层的。因此]，热损耗在整个核心上并不是常数。在 FLUENT 中，描述热交换器核心的流体区域被再细分为几个沿着冷却路径的肉眼可见的单元以及防热瓦（见图一）。计算出相对于每一个防热瓦的冷却剂入口温度，然后用于计算每一个防热瓦的热损耗。这种方法可以很真实地提供热交换核心周围的热损耗分布。

要使用热交换模型，你必须定义描述如交换核心的流体区域。最为典型的处理是将流体区域的尺寸设定为核心自己的尺寸。作为程序的一部分，你需要定义冷却剂的路径，防热瓦的数量、核心的物理性质和操作条件（压降参数、热交换效力，冷却剂流速等）。定义完模型之后，FLUENT 会自动将流体区域设为多孔区域。

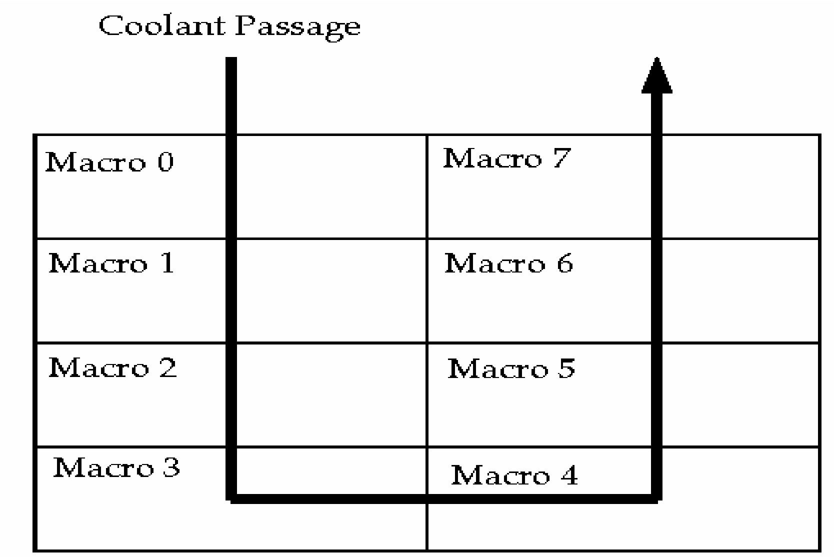


Figure 1: 核心被离散为 4×2 的防热瓦

热交换模型理论

在 FLUENT 中，热交换核心被处理成具有动量转移和热转移的流体区域。压力损失在动量方程中被模拟为动量损失项，热传导在能量方程中被模拟为热源项。

流向压降

在热交换器模拟中，压力损失用多孔介质模型来模拟。多孔介质的输入是在你向热交换器模型中输入的基础上自动设定的。流向压降可以表示为：

$$\frac{\partial p}{\partial s} = \frac{1}{2} f \rho_m U_{A_{\min}}^2$$

其中

$\frac{\partial p}{\partial s}$=流向压力梯度

f=流向压力损失系数

r_m=平均空气密度

U_A_min=在最小流动面积处的空气速度

压力损失系数由下式计算：

$$f = \left(K_c + 1 - \sigma^2\right) - \left(1 - \sigma^2 - K_e\right) + f_c \frac{A}{A_c}$$

其中：

s=最小的流到界面区域比例

K_c=入口损失系数

K_e=出口损失系数

A=空气边界面面积

A_c=通过流动区域的最小截面

f_c=核心的摩擦系数

当设定热交换模型时，你需要指定这些参数。

在方程 3 中，核心摩擦系数定义为：

$$f_c = a \mathrm{Re}_{\min} b$$

其中：

a=核心摩擦系数

b=核心摩擦指数

Re_min=对于最小流动面积处速度的雷诺数

在设定热交换模型时，你需要指定核心摩擦系数与指数。

方程 5 中的雷诺数定义为：

$$\mathrm{Re}_{\min} = \frac{\rho U_{A_{\min}} D_h}{\mu_m}$$

其中：

r_m=平均空气密度

m_m=平均空气粘性
D_h=水力学直径
U_A_min=在最小流动面积处的空气速度
对于热交换器核心，水力学直径可以定义为：

$$D_h = 4L\left(\frac{A_c}{A}\right)$$

注意：U_A_min 可由下式计算：

$$U_{A_{\min}} = \frac{U}{\sigma}$$

其中 U 是空气速度，s 是流过表面面积比的最小流动。

热损耗

在防热瓦每个单元的热损耗被计算出来，然后作为源项加到空气流动的能量方程中。给定单元的热量转移由下式计算：

$$q_{cell} = \varepsilon\left(\dot{m}c_p\right)_{air}\left(T_{in} - T_{cell}\right)$$

where
e=热交换器效力
(m(dot) c_p)_air=空气热容速度(流速乘以指定的热容
T__in=冷却单元的防热瓦的冷却剂入口温度
T_cell=单元温度
从防热瓦的热损耗为防热瓦所有单元的总热量转移之和：

$$q_{marco} = \sum_{all\quad cells\quad in\quad marco} q_{cell}$$

从热交换核心的热损耗为所有防热瓦的热损耗之和：

$$q_{total} = \sum_{all\quad mar\cos} q_{marcol}$$

每个防热瓦的冷却剂入口温度（方程 1 中的 T）是基于冷却剂流动的能量平衡计算得到的。对于给定防热瓦：

$$q_{marco} = \left(\dot{m}c_p\right)_{coolant}\left(T_{out} - T_{in}\right)$$

其中 T__in 和 T__out 分别为防热瓦内冷却剂的入口和出口温度。T__out 是下一个防热瓦的入口温度。
假定第一个防热瓦（Macro 0）在冷却剂核心的入口处（参阅热交换模型概述中的图 1）当从热交换器核心的热损耗被指定后，开始迭代计算第一块防热瓦的入口温度，以便于使得方程 1、3、5、7 同时满足。当固定入口冷却剂温度指定之后，第一块防热瓦的入口温度也就定了。热量的增加从方程 1 计算出来，下一块防热瓦的冷却剂入口温度由方程 7 计算得到。

假设和约束

在热交换模型中作如下假设：

- 热交换器的效力 e 是为完全的热交换器定义的，可以应用于由计算单元所描述的热交换器的一小部分中。
- 空气热容量速度(m(dot) c_p)小于冷却剂热容量速度。
- 单元温度（即单元质心值）可用于替代进入单元的流涕的温度。
- 在计算压力损失系数时，流体加速的影响可以忽略。
- 冷却剂限定为单相。

使用热交换模型

设定热交换模型的步骤为：

1. 在能量面板中激活能量计算，菜单：Define/odels/nergy...。
2. 使用热交换器面板（下图）指定热交换模型的输入，菜单：Define/ser-Defined/eat Exchanger...。

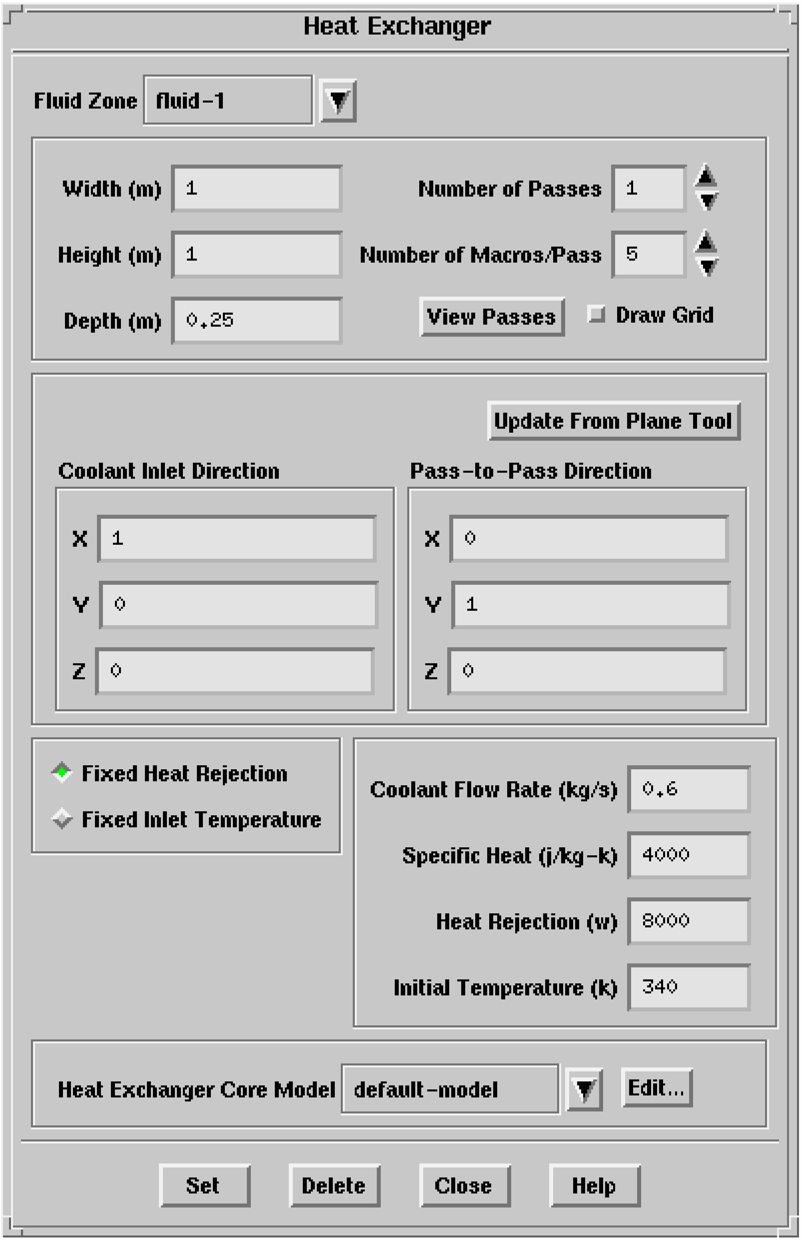


Figure 1：热交换器面板

3. 选择描述热交换核心的流体区域。
4. 指定热交换核心的尺寸
5. 指定冷却剂入口和通道到通道方向
6. 定义防热瓦网格
7. 指定冷却剂属性和条件
8. 指定热交换核心的压降参数和效力
9. 在热交换器面板中点击设定按钮保存所有的设定。
10. 对于其它热交换器流体区域重复以上步骤 。

选择热交换区域

在流体区域下拉列表中选择你所要定义的热交换器的流体区域。

指定热交换核心的维度

设定热交换核心的宽度、高度和深度。高度为沿着冷却剂入口的方向定义（见定义防热瓦中的图 1)，宽度方向定义为通道到通道方向。

指定冷却剂入口和通道到通道方向

要定义冷却剂方向和流动路径，你需要指定冷却剂入口和通道到通道方向的方向矢量。定义防热瓦一节中的图 1 表明了相对于防热瓦的这些方向
如果热交换器核心的主轴和区域坐标轴不在一条直线上，你不必知道先前的冷却剂入口和通道到通道方向的方向矢量。在这种情况下，平面工具可以帮你确定这些方向矢量。

1. 捕捉平面工具到热交换器核心的边界（请遵照初始平面工具一节中有关于在已有表面上初始化工具位置的相关内容)。
2. 适当的平移和旋转工具的轴，直到它们和热交换器核心的主要方向成一条线。流向的方向用红轴确定，冷却剂入口方向为绿轴，通道到通道方向用蓝轴。
3. 一旦轴在一条线上，在热交换器面板中点击从面板工具更新按钮。方向矢量会自动设定（注意：从面板更新按钮也会设定热交换器核心的高度、宽度和深度)。

定义防热瓦

正如热交换模型概述中所讨论的，描述热交换核心的流体区域被分成多块防热瓦。防热瓦的创建是基于指定通道数目、每一个通道的防热瓦数目以及相应的冷却剂入口和通道到通道方向（见图 1)。防热瓦在冷却剂流动方向上从 0 开始计数直到 n-1，n 为防热瓦数量。

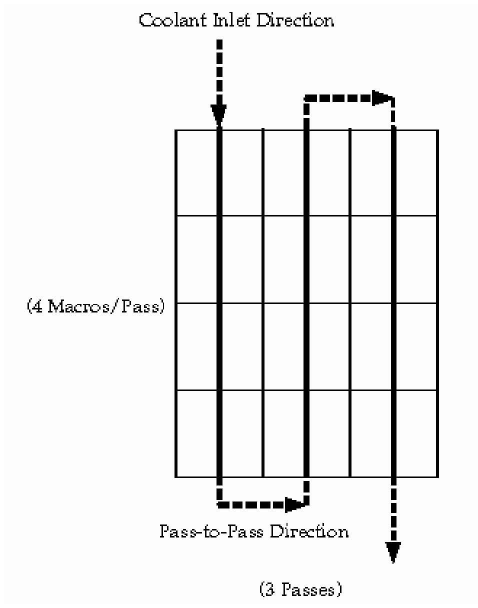


Figure 1:3×4 的防热瓦

在热交换模型面板中，指定通道数量以及每个通道防热瓦的数量。模型会自动标定你指定了深度的热交换器核心的防热瓦数目。

你可以通过显示防热瓦来查看冷却剂的路径。为了看到你指定了通道数和每个通道的防热瓦数的所有防热瓦，你可以点击面板底部的设定按钮。然后点击查看通道按钮来显示它。冷却剂路径使用颜色来标定，第一个防热瓦为红色，最后一个为蓝色。

对于有些问题，尤其是复杂几何外形的问题，你可能需要在防热瓦图中包括几部分计算区域网格，作为空间参考点。例如，你可能要显示沿着防热瓦的入口和出口的位置。要实现这一目的，你只需要打开画网格选项，自动弹出网格选项面板，然后可以在那里设定网格显示参数。当你在热交换器面板中点击察看通道按钮，网格显示面板中定义的网格显示会被包含在防热瓦图形中（见下图）。

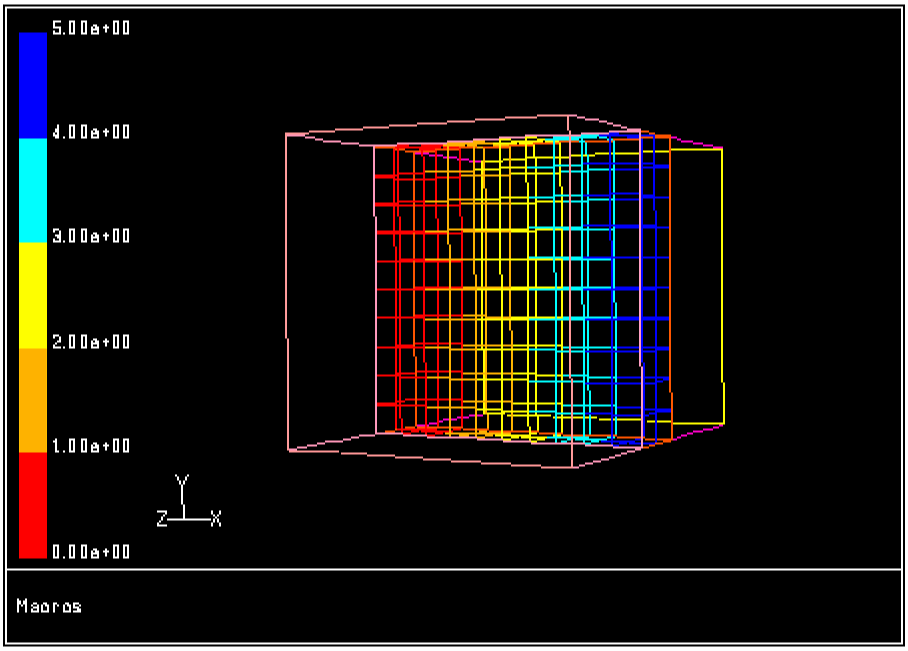


Figure 2:带防热瓦的网格显示

指定冷却剂性质和条件

要定义冷却剂性质和条件，你需要分别指定热损耗一节中方程 7 的冷却剂流速，热量(m(dot)和 c_p，以及热损耗和初始温度（模拟固定热损耗时）或者入口温度（模拟固定的入口冷却剂温度时）。

- 如果你要在指定热损耗的基础上用 FLUENT 计算冷却剂入口温度：步骤如下。
  - 激活固定热损耗选项。
  - 指定热损耗（热损耗一解方程 5 中的 q_total）。.
  - 指定初始温度，它将被 FLUENT 用于初始入口温度的预测（热损耗一节中方程 1 和方程 7 的 T__in）。

- 如果你要用给定的入口冷却剂温度来计算核心的总热损耗，步骤如下：

1. 激活固定入口温度选项
2. 指定入口温度（热损耗一节中方程 1 和方程 7 的 T__in）。

设定压降参数和效力

压降参数和效力定义了热交换器核心的模型。共有三种方法来指定热交换器核心模型的参数：

- 使用 FLUENT 磨人的热交换核心模型的参数。
- 用自己的值来定义新的热交换核心模型。
- 从外部文件中读入热交换核心模型。

你所定义的模型会保存在 case 文件中

FLUENT 为典型的热交换核心提供了默认的设定。要保留这些设置，只需要在热交换器面板中的热交换器核心下拉列表选择保留默认模型即可。（在热交换模型面板中你可以看到热交换核心的默认参数，具体请参阅设定压降参数和效力一节。）

如果你想要定义设定压降参数和效力，这和默认的热交换核心模型是不同的，你可以创建自己的新模型，创建新模型的方法如下：

1. 在热交换核心模型下拉菜单的右边电机编辑按钮，打开热交换模型面板（下图）

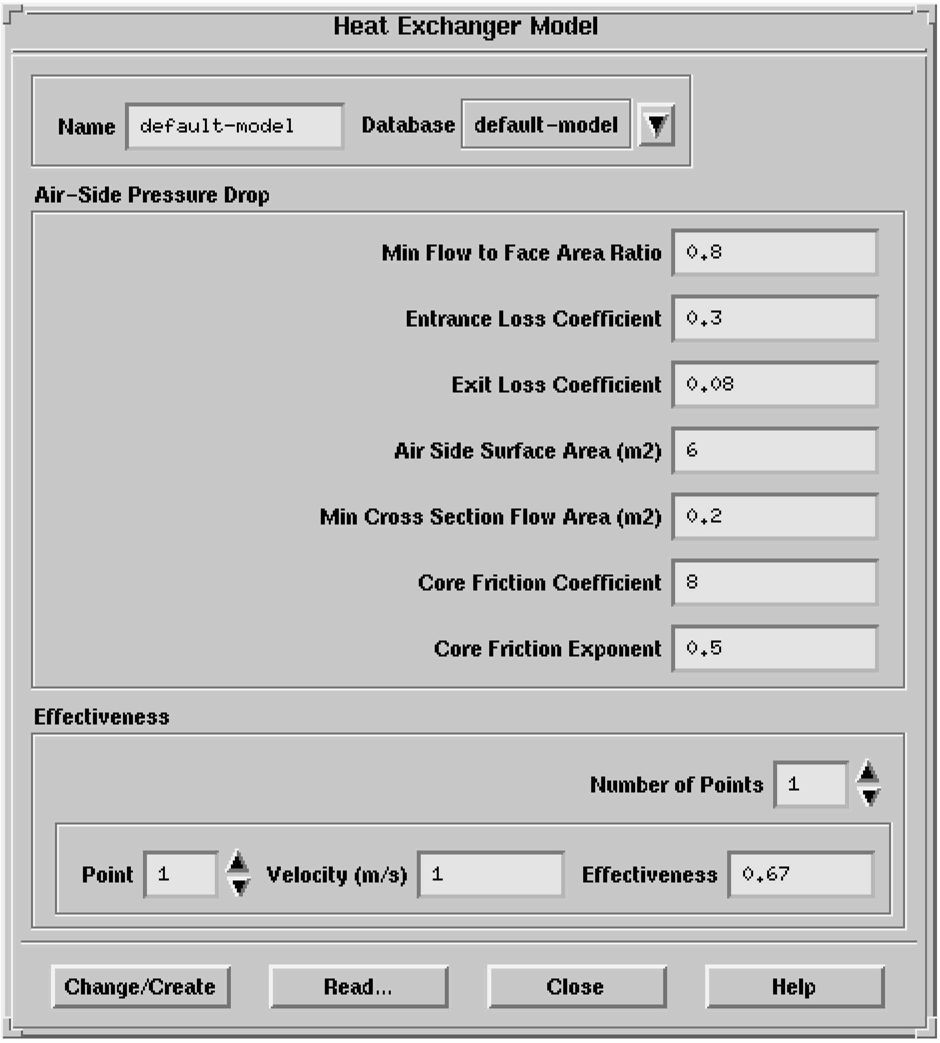


Figure 1: 热交换模型面板

2. 在面板顶部的名字框中输入新模型的名字
3. 在空气边压降中指定流向压降一节中的方程 3 中的下面参数：

Min Flow to Face Area Ratio (s)

Entrance Loss Coefficient (K_c)

Exit Loss Coefficient (K_e)

Air Side Surface Area (A)

Min Cross Section Flow Area (A_c)

以及流向压降一节中的方程 5 的

the Core Friction Coefficient 和 Core Friction Exponent （a 和 b）。

4. 在效力框中，指定热核心的效力（热损耗一节中的方程 1）为常数或者包含 n 个点的分段线性轮廓。

- 要指定常数效力，保留默认的点数，并在效力框中指定值。
- 为效力指定轮廓，步骤如下：
  1. 在轮廓中指定点数
  2. 对于每个点输入速度和相应的效力

5. 点击改变/创建按钮，将你的新模型添加到数据库中。

你可以从外部为你的热交换核心读入参数。下面是一个例子：

```
("modelname"
  (0.73 0.43 0.053 5.2 0.33 9.1 0.66)
  ((1 1.0 .6234) (2 2.0 0.5014) (3 3.5 0.3932)
   (4 5.0 0.3244) (5 6.5 0.2762) (6 8.0 0.2405)
   (7 10.0 0.2050) (8 12.0 0.1785) (9 15.0 0.1495)))
```

文件的第一条为模型的名字（比如：modelname），第二个设定的数包含了空气边压降参数：(s K_c K_e A A_c a b) 。第三条为一组描述效力轮廓的点。每一个轮廓中的点具有如下格式： (point velocity effectiveness)。

在这个例子文件中，效力轮廓中指定了九个点。

要读入外部热交换器文件，步骤如下：

1. 在热交换器模型面板中点击读入按钮。
2. 点击选择文件对话框，指定 HXC 参数文件名，并点击 OK。FLUENT 会读入热交换器核心模型参数，并将新的模型参数加入到数据库。

要察看你所定义的热交换器模型的相关数据，请在数据库下拉列表（热交换器模型面板）中选择模型名字。数据库中关于该模型的值会在热交换模型面板中显示出来。

热交换模型的后处理

要察看你的热交换核心的总热损耗、出口温度以及入口温度的值，你可以用下面的命令：define/models/heat-exchanger/heat-exchanger-report。当提示时，指定你想要计算结果的流体区域（如：1）。

边界轮廓

FLUENT 提供了非常灵活的边界轮廓定义机制。这一功能允许你用写轮廓面板（参阅读写轮廓文件一节），使用实验数据、外部程序产生的数据或者先前解写入的数据作为变量的边界条件。

边界轮廓指定类型

提供了四种轮廓

- 点轮廓由一组无序的 n（$1 \le i \le n$）个点指定。使用写轮廓面板以及随机排列的实验数据写入的轮廓就是点轮廓的例子。FLUENT 会在点云中插值来获取所需的边界表面的值。对于非结构点数据为零阶插值。换句话说，对于边界的每一个单元表面，解算器使用轮廓文件中离单元最近的点。因此，如果你对入口轮廓有明确的指定，你的轮廓文件应该有足够高的点密度。
- 线轮廓是为二维问题指定的，它使用了 n 个有序的点(x_i,y_i,v_i)，其中$1 \le i \le n$。点与点之间采用零阶插值。从外部程序计算边界层所获得轮廓数据就是线轮廓的例子。
- 网格轮廓是为三维问题指定的 m 乘以 n 的网格点，其中$1 \le i \le n$，$1 \le j \le m$。点与点

之间是零阶插值。从结构网格解和规则阵列实验数据中获取的数据轮廓就是网格轮廓的例子。

- 放射状轮廓是为二维或者三维问题指定的，它使用了一组有序的点(r_i,v_i)其中 $1 \le i \le n$ 。放射状轮廓中的数据只是半径的函数。点与点之间使用线性插值。柱坐标系的轴向确定的方法如下：
  - 对于二维问题，为通过(0,0)点的 z 向矢量。
  - 对于二维轴对称问题，为通过(0,0)点的 x 向矢量。
  - 对于包含旋转风扇的三维问题，它就是风扇面板中定义的风扇轴（除非你在边界处使用下面所介绍的当地柱坐标系）。
  - 对于不包含旋转风扇的三维问题，它为流体面板中定义的邻近流体区域的旋转轴（除非你在边界处使用下面所介绍的当地柱坐标系）。
  - 对于使用当地柱坐标系指定边界处条件的三维问题，它为所指定的当地柱坐标系的轴。

边界轮廓文件格式

轮廓文件的格式相当简单。文件可以包含任意数量的轮廓。每一个轮廓都包含指定的轮廓名，轮廓类型（点、线、网格或者辐射），以及定义点的数目作为轮廓头，后面是任意数量名字为"fields"的行。其中的一些 fields 包含坐标点，剩下的包含边界条件。需要注意的是所有的量，包括坐标值都必须是国际标准单位，因为读入轮廓文件是没有执行单位转换。圆括号用于划分轮廓和轮廓中的场。用跳格符（tab）、空格符或者回车符可以分割单元。
在下面所描述的一般的格式，“|”表示你只能选择“|”所分隔开的一个选项。

```
((profile1-name point|line|radial n)
 (field1-name a1 a2 ... an)
 (field2-name b1 b2 ... bn)
 .
 .
 .

 (fieldf-name f1 f2 ... fn))

((profile2-name mesh m n)
 (field1-name a11 a12 ... a1n
              a21 a22 ... a2n
              .
              .
              .
              am1 am2 ... amn)
 .
 .
 .
 (fieldf-name f11 f12 ... f1n
              f21 f22 ... f2n
              .
```

.
.
fm1 fm2 ... fmn))

点、线或者网格类型的轮廓必须包含名字为 x，y 或者 z（对于三维问题）的场。辐射类型的轮廓必须包含名字为 r 的场。剩下的名字是任意的，不过必须是 Scheme 符号。如果轮廓类型丢失的话，为了与老版本的轮廓文件兼容，将该文件假定为点轮廓文件。

例子

边界轮廓文件的最典型的使用就是定义入口的边界层。对于可压流计算，就可以用总压、k 和 e 来指定轮廓。对于不可压流，指定流向速度和 k、e 更好。下面就是一个例子。

```
((turb-prof point 8)
(x
    4.00000E+00     4.00000E+00     4.00000E+00     4.00000E+00
    4.00000E+00     4.00000E+00     4.00000E+00     4.00000E+00 )
(y
    1.06443E-03     3.19485E-03     5.33020E-03     7.47418E-03
    2.90494E-01     3.31222E-01     3.84519E-01     4.57471E-01 )
(u
    5.47866E+00     6.59870E+00     7.05731E+00     7.40079E+00
    1.01674E+01     1.01656E+01     1.01637E+01     1.01616E+01 )
(tke
    4.93228E-01     6.19247E-01     5.32680E-01     4.93642E-01
    6.89414E-03     6.89666E-03     6.90015E-03     6.90478E-03 )
(eps
    1.27713E+02     6.04399E+01     3.31187E+01     2.21535E+01
    9.78365E-03     9.79056E-03     9.80001E-03     9.81265E-03 )
)
```

使用边界轮廓

下面是用边界轮廓来定义边界条件的步骤：

1. 创建包含所需轮廓的文件，格式请参阅边界轮廓文件一节。
2. 在边界轮廓面板中（在检查和删除轮廓中的图 1）或者点击点击 File/Read/Profile...菜单读入边界轮廓文件。
3. 在边界条件面板中（比如速度和压力入口面板），轮廓文件定义的场（以及其它你所读入的边界轮廓文件）。会出现在边界轮廓所指定的每一个参数的右边或者下边的下拉列表中。要使用某一轮廓在列表中选择即可。

注意：如果你使用边界轮廓面板读入一个文件，而文件中的轮廓名和已有的轮廓名相同，旧的轮廓就会被覆盖掉。

例子

检查和删除轮廓

每一个轮廓文件包含一个或多个轮廓，每一个轮廓中会有一个或多个场定义于其中。一旦你读入一个轮廓文件，你就可以检查每一个文件中都定义了什么场，你还可以删除特定的轮廓。具体操作在边界轮廓面板中完成（如下图）。菜单：Define/Profiles...。

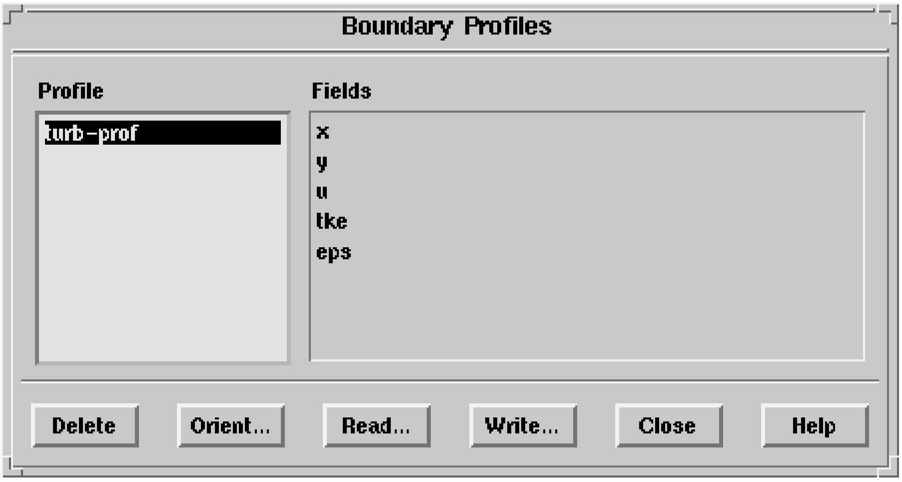


Figure 1:边界轮廓面板

要检查在特定的轮廓中指定了那些场，请在轮廓列表中选择轮廓名。然后其中所定义的场就会显示在场的列表中。上图中，轮廓文件所列的场就是上面那个例子所定义的。要删除轮廓文件，只需点击相应的轮廓名然后点击相应的按钮即可。轮廓删除之后相应的场列表也随之删除了。

例子

如下图所示，对于上面的那个例子，轮廓用于指定 x 方向速度、湍流动能、湍流动能耗散的入口值。（y 向速度设为零，因为假定它可以忽略。但是 y 向速度轮廓也被使用了。）

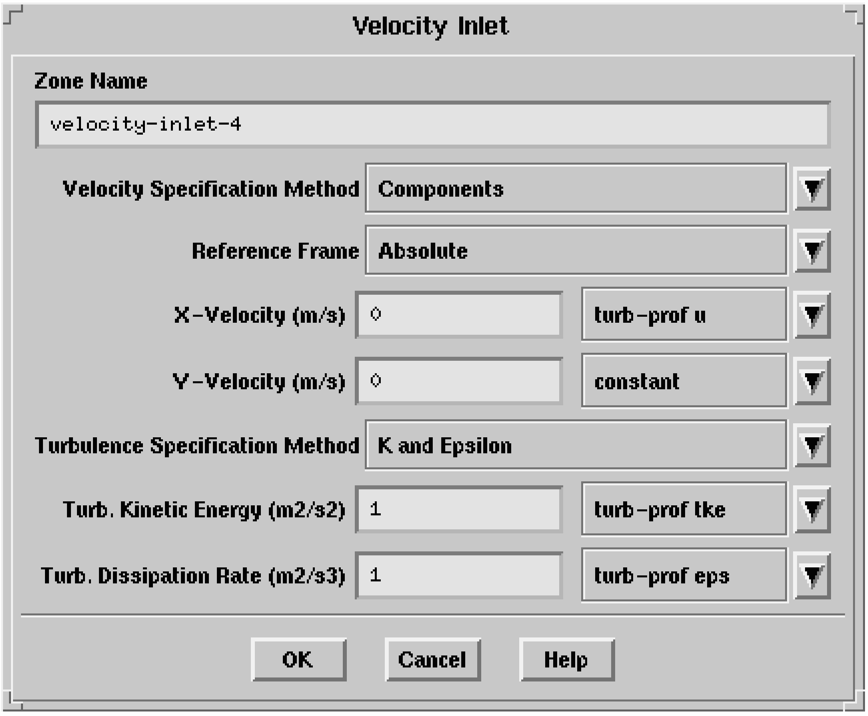


Figure 1:作为边界条件的轮廓的例子

轮廓文件被指定之后，边界条件也就被保存了，此时流动解被初始化了，你可以遵照下面的步骤察看轮廓。

- 对于二维计算，打开解的 XY 图面板。选择表面列表中适当的边界区域，然后在 Y 轴函数下拉列表中选择所感兴趣的变量，然后选择绘图方向。要保证节点值检查按钮是打开的，然后点击画图按钮。这样你就可以看到入口轮廓图了。如果所画的数据图和你所指定的轮廓不符，这意味着轮廓文件有错误。
- 对于三维计算，使用等值线面板来显示适当边界区域表面的等值线值。节点值检查按钮必须打开以保证你可以看到轮廓数据。如果所画的等值线图和你所指定的轮廓不符，这意味着轮廓文件有错误。

重定向边界轮廓

FLUENT 允许你改变已有边界轮廓的方向，以便于这一边界可以定位于空间任意位置。这一功能很有用，比方说，你可以将入口实验数据定位于一个方向，然后将它应用于具有不同方向的模型中。需要注意的是，FLUENT 假定轮廓和边界是平的。

改变轮廓方向的步骤

在边界的主要方向上重定向边界轮廓数据的程序如下：

1. 定义并读入边界轮廓（可参阅使用边界轮廓一节）。
2. 在边界轮廓面板中，在轮廓列表中选择轮廓，然后点击定向按钮，打开下面的定向面板：

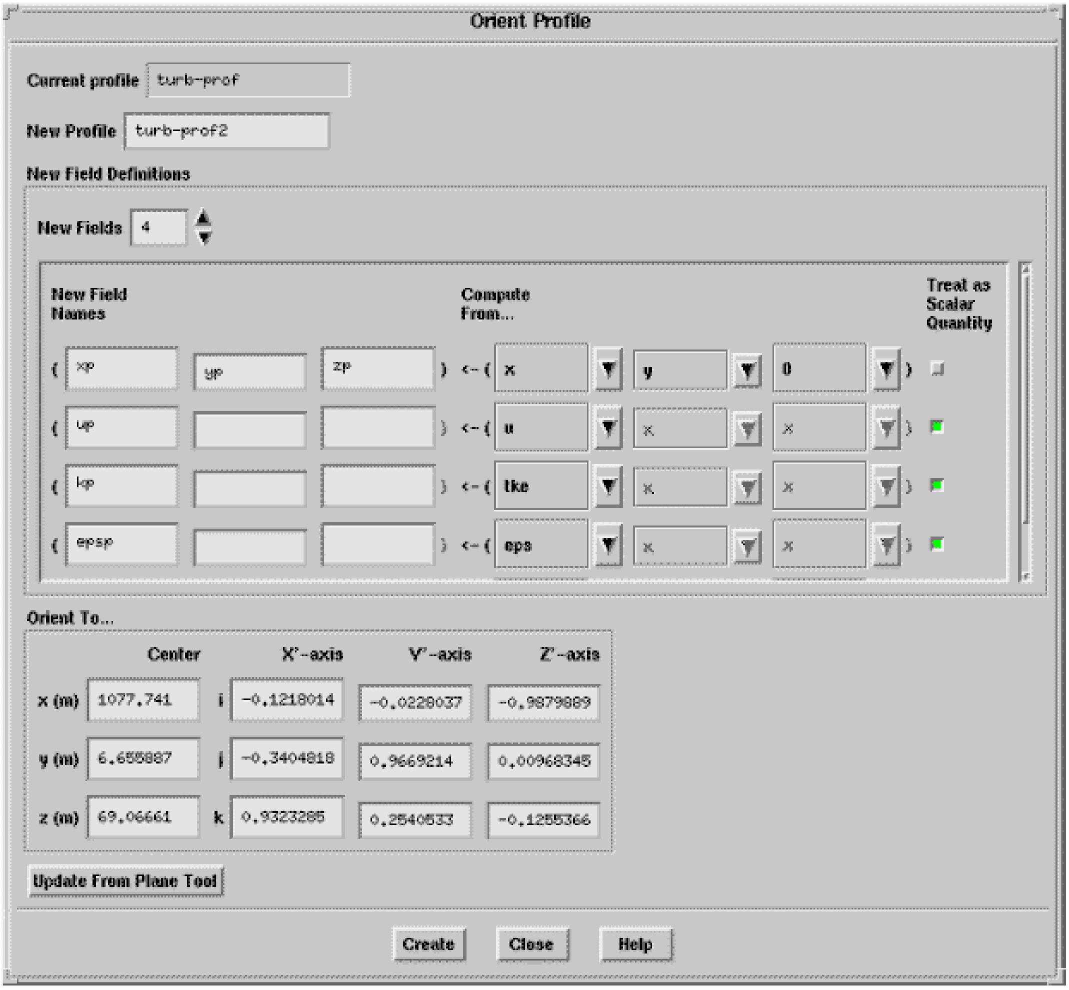


Figure 1: The Orient Profile Panel

3. 在定向轮廓面板中输入你在新轮廓框中所要创建的新轮廓名。
4. 使用新轮廓框的上下箭头来指定你所要创建的场的数目。新场的数目等于矢量和标量的数目加一（坐标系）。
5. 定义坐标场：
    1. 在新场名字下面的第一行输入三个坐标的名字。
    2. 在从……计算（Compute From....）的下面的下拉列表中选择 x、y 和 z 适当的当地坐标（选择 0 表明最初的轮廓文件中没有坐标存在，也就是说原始轮廓文件是在二维中定义的。）
6. 在新的轮廓中定义矢量场：
    1. 在新场名字框中输入边界坐标轴的三个分量的名字。
    2. 在从……计算（Compute From....）的下面的下拉列表中选择矢量在 x、y 和 z 三个方向上的边界轮廓的名字。
7. 在新的轮廓中定义标量场：
    1. 在标量场名字下面的第一行输入标量的名字。
    2. 在同一排，点击处理为标量下面的按钮。
    3. 在从……计算（Compute From....）下面的第一个下拉列表的中选择标量名。
8. 在定向到……（Orient To...）的下面指定在中心场中的当地坐标系的起点的坐标。
9. 在定向到……（Orient To...）的下面指定 X'、Y'和 Z'州的方向矢量。X'、Y'和 Z'轴是主

轴的方向矢量、次轴的方向矢量以及垂直于边界的矢量。每一个方向都是从（0，0，0）到（x，y，z）的矢量。.

对于有些问题，X'、Y'和 Z'轴与区域的坐标轴不在一条直线上，你不需要知道先前的方向矢量。在这种情况下，平面工具可以帮助你确定方向矢量和坐标轴的中心（起点）。

4. 捕捉平面工具到边界（请遵照初始平面工具一节中有关于在已有表面上初始化工具位置的相关内容）。
5. 适当的平移和旋转工具的轴，直到它们和轴的主要方向成一条线，工具的起点和边界的中心重合。
6. 在方向轮廓面板中点击从面板工具更新按钮。FLUENT 会自动设定平面工具轴的的起点为中心，X'轴为工具绿箭头的方向，Y'轴为蓝箭头，Z'轴为红箭头。

10. 在方向轮廓面板中点击创建按钮，新的轮廓就创建出来了。它的名字（在新轮廓对话框中输入的）会在边界轮廓面板中出现。现在就可以使用这个轮廓来处理边界了。

定义质量、动量、能量和其它源项

你可以在流体区域定义质量（单或多组分）、动量、能量、湍流和其它标量的体积源项，或者在固体区域定义能量源项。当你已知源项时，这些功能是很有用的。（对于更为复杂的函数相关源项，你可以使用边界轮廓文件或者自定义函数（具体参阅相关内容）。要将源项加到一个活着一组单元，你必须将这个单元或者这组单元放进独立的区域。然后将源项应用到单元区域。下面是最为典型的用法：

- 流动的源项不能用入口描述，比如流出的量。如果你需要模拟比单元小的入口，你可以将小入口所在的单元放在它自己的流体区域中然后定义那个区域的质量、动量、能量源项。对于图 1 所示的例子，你需要设定质量源项(m(dot)/V) = (r_j A_j v_j/V)和动量源项(m(dot) v/V) = (m(dot) v_j/V)，其中 V 是单元体积。
- 你的模型中没有明确定义由于热释放产生的源项（如：火）。对于这种情况，你可以将单元放在热最初释放的流体单元中，然后在那个区域定义能量源项。
- 对于共轭热传导应用，能量源项在固体区域。在这种情况下，你可以将单元放在热最初释放的固体单元中，然后在那个区域定义能量源项。
- 模型中没有明确包括由于反应而产生的组分源项。在上面模拟火的例子中，你可能需要定义由于描述烟的产生而定义的组分源项。

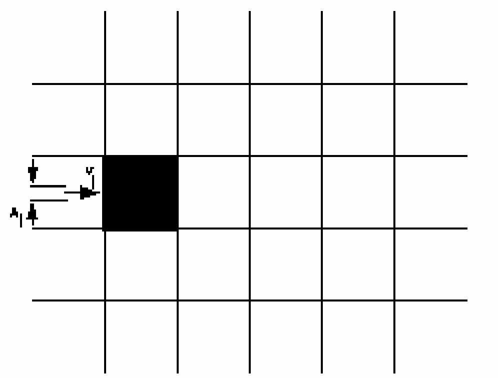


Figure 1: Defining a Source for a Tiny Inlet

注意：如果你定义单元区域的质量源项，你还要定义动量源项，而且在合适的情况下，

对于你的模型还要定义能量和湍流源项。如果你只定义质量源项，进入区域的质量不携带动量和热量。因此质量也就不得不被流体加速或者加热，而且相应地会有一个速度或者温度下降。这一下降可能是显而易见的也可能不是，这依赖于源项的尺寸。(注于：只接受动量、能量或者湍流源项的定义。)

定义源项的程序

标记的约定和单位

所有正的源项表示的是源，负的是汇。单位必须是国际标准单位：

定义源项的步骤

要为一个或更多的区域定义源项，请遵循如下步骤（记住使用 SI 单位）：

1. 在流体或者固体面板打开源项选项。
2. 设定适当的源项值，注意下面的注释：

- 要指定常数源项，在邻近源项框的下拉列表中选择（或者保持）常数，然后在框中输入常数值。
- 指定温度相关或者其它函数源项，你可以用边界轮廓（见边界轮廓一节），或者自定义函数（见自定义函数一节）。
- 记住你不应该只定义质量源项而不定义其它源项，请参阅定义质量、动量、能量和其它的源项一节。
- 因为你所指定的源项时提及源项，所以要确定源项的适当值，你要确定定义了源项的区域的单元的体积。要实现这一目标你可以为单元区域创建界面，然后使用等值线面板来显示问题中的区域的单元体积（在网格类别中）。

质量源项

如果你的问题只有一个组分，你可以简单的只定义那个组分的质量源项。质量源项的单位是 kg/m^3-s。在连续性方程中（质量守恒方程），所定义的质量源项在 S_m 项中出现。

如果不止一个组分，你可以为每一个组分指定质量源项。除了最后一个你所定义的，每一组分（例如：h2，o2）将会有一个明确的源项列表。要为最后一个组分定义质量源项，请在质量源项框中指定数值。质量源项的单位为 kg/m^3-s。在化学组分守恒方程（组分输运方程一节中的方程 1）中，所定义的质量源项会出现在 S_i^'项中。

动量源项

要定义动量源项，请指定 X、Y 和/或 Z 方向的动量项。动量源项的单位为 N/m^3。在动量方程中（动量守恒方程），所定义的动量源项会出现在 F_i 项中。

能量源项

要定义能量源项，请指定一个能量项，其单位是 W/m^3。在能量方程（能量方程一节

中的方程 1）中，所定义的能量源项会在 S_h 项中出现。

湍流源项

要定义 k 或 e 的源项，请指定湍流动能和湍流耗散速度项。其中，k 源项的单位是 kg/m-s^3，e 源项的单位是 kg/m-s^4。

所定义的 k 的源项会作为附加项出现在湍动能方程的右手边（比方说标准 k-e 模型的输运方程一节中的方程 1）。

所定义的 e 的源项会作为附加项出现在湍流耗散速度方程的右手边（比方说标准 k-e 模型的输运方程一节中的方程 3）。

物理性质

本章描述了用于计算物质的性质以及相应程序的物理方程，在程序中你可以输入物质的每一种性质。以下各节详细介绍了计算物质的物理性质

设定物理性质是模型设定中的重要一步。

材料属性是在材料面板中的 1 中定义的，它允许你输入各种属性值，这些属性值和你在模型面板中定义的的问题范围相关。这些属性可能会包括：

密度或者分子量

粘性

比热容

热传导系数

质量扩散系数

标准状态焓

分子运动论中的各个参数

属性可能是温度和/或成分相关的，温度相关是基于你所定义的或者有分子运动论计算得出的多项式、分段线性或者分段多项式函数和个别成分属性。

使用材料面板中的 1 就会显示所使用的模型需要定义的物理性质。需要注意的是，如果你所定义的属性需要借能量方程（如理想气体定律的密度，粘性的温度相关轮廓），FLUENT 会自动去解能量方程。此时你就需要定义热边界条件和其它参数。

固体材料的物理属性

对于固体材料，我们只需要定义密度，热传导系数和比热容(除非你所模拟的是半透明介质，此时需要定义辐射性质。对于热传导系数你可以指定它们为常值，也可以指定为温度的函数或者自定义函数；对于比热容你可以指定为常值或者温度的函数；对于密度你可以指定为常值

如果你使用非耦合解算器，除非我们是在模拟非定常流或者运动的固体区域，否则对于固体材料我们可以不需定义其密度和比热容。对于定常流来说固体材料列表中也会出现比热容一项，但是该值只被用于焓的后处理程序中，计算时并不需要它

材料类型

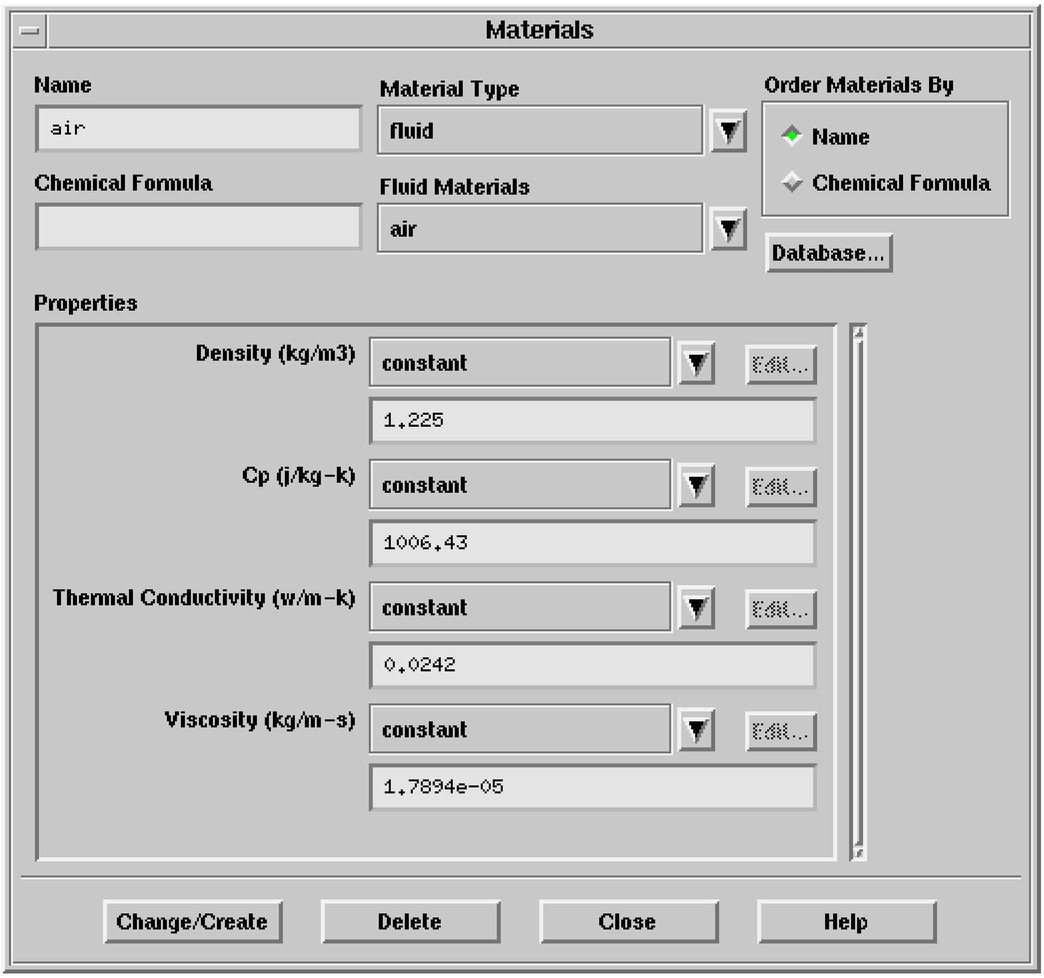
在 FLUENT 中，流体和固体的物理性质是与名字"materials"相关的，这些物理性质分配给区域作为边界条件。当你模拟组分输运时，你就需要定义混合材料，该材料包括所解决问题的各种各样材料。混合物的物理性质会被定义，其中也包括流体材料的组成部分（混合材料的概念将会在混合材料一节详细讨论）。离散相模型的附加材料类型也可以使用，请参阅离散相材料的概念一节。

材料的定义可以从零开始，也可以从全局(site-wide)数据库中下载并编辑。关于修改全局数据库请参阅自定义材料数据库一节。

注意：当前你的材料列表中所有的材料都会被保存在 case 文件中。如果你将这个 case 文件读入到新的解算器进程，你就可以使用这些材料。

使用材料面板

1(图 1)允许你创建新的材料，或者从全局数据库复制材料，也可以修改材料的属性。菜单：Define/Materials...。



图一：材料类型面板

这节将会介绍本类函数，温度相关属性的输入将在使用温度相关函数定义属性一节介绍。要指定每一个材料属性的输入请参阅本章下面的其他节。

在解算器进程中，你目前的材料列表会包括一个单一的流体材料（空气）和单一的固体材料（铝）。如果你所解决的问题就是空气，你就可以是用默认值或者修改属性。如果流体是水，你可以从全局材料数据库中复制或者从新创建新的材料。如果是从数据库中复制的，你还可以修改所复制过来的材料的属性。

除非你激活组分输运（请参阅化学组分输运和反应流），否则混合材料不会出现在你的下拉列表中。相似地，惰性的，滴状的和燃烧的例子材料也不会出现，除非你为这些粒子类型创建离散相粒子射流（请参阅离散相模型）。当从数据库中复制离散相模型时，所有组成的流体材料（组分）也会自动复制过来。

修改已经存在的材料的属性

使用材料面板最常做的就是修改材料属性，下面是修改的步骤：

1. 在材料类型下拉菜单中选择材料类型（流体、固体等）。
2. 在流体、固体或其它材料下拉菜单中选择你所要修改属性的材料。(列表名和第一步中所选的材料类型一致)
3. 修改相关属性
4. 点击改变/创建按钮将所选择的材料的属性改变为新的属性。

要改变别的材料的属性只需要重复上述步骤即可。需要记住的是在改变每一个材料属性之后别忘了点击改变/创建按钮。

重命名已经存在的材料

每一个材料由名字和分子式（如果存在的话）定义。你可以改变材料名但是不能改变分子式，除非你创建新的材料。改变材料名字的步骤如下：

1. 在材料类型下拉列表中选择材料（流体、固体及其它）。
2. 在材料下拉列表中选择需要修改属性的材料。（列表名必须和第一步中所选的材料类型一致）。
3. 在面板顶部的名字框中输入新的名字。
4. 点击改变/创建按钮。会弹出一个问题对话框，询问你是否覆盖原来的材料。因为你只是简单的改变原来材料的名字所以你可以点击 Yes 覆盖掉。（如果你是创建新的材料，你就需要点击 No，保留原来的材料）

要修改别的材料，遵循上面的步骤就行，只是要记住改变每一个材料名字之后点击改变/创建按钮。

从数据库复制材料

全局(site-wide)材料数据库包含很多常用的流体、固体和混合材料，其数据来源于几个不同的资源[106]，[134]，[176]。如果你希望使用某一材料，你可以简单的从数据库中复制材料到当前材料列表中。复制步骤如下：

1. 在材料面板中点击数据库按钮，打开数据库材料面板（如下图）

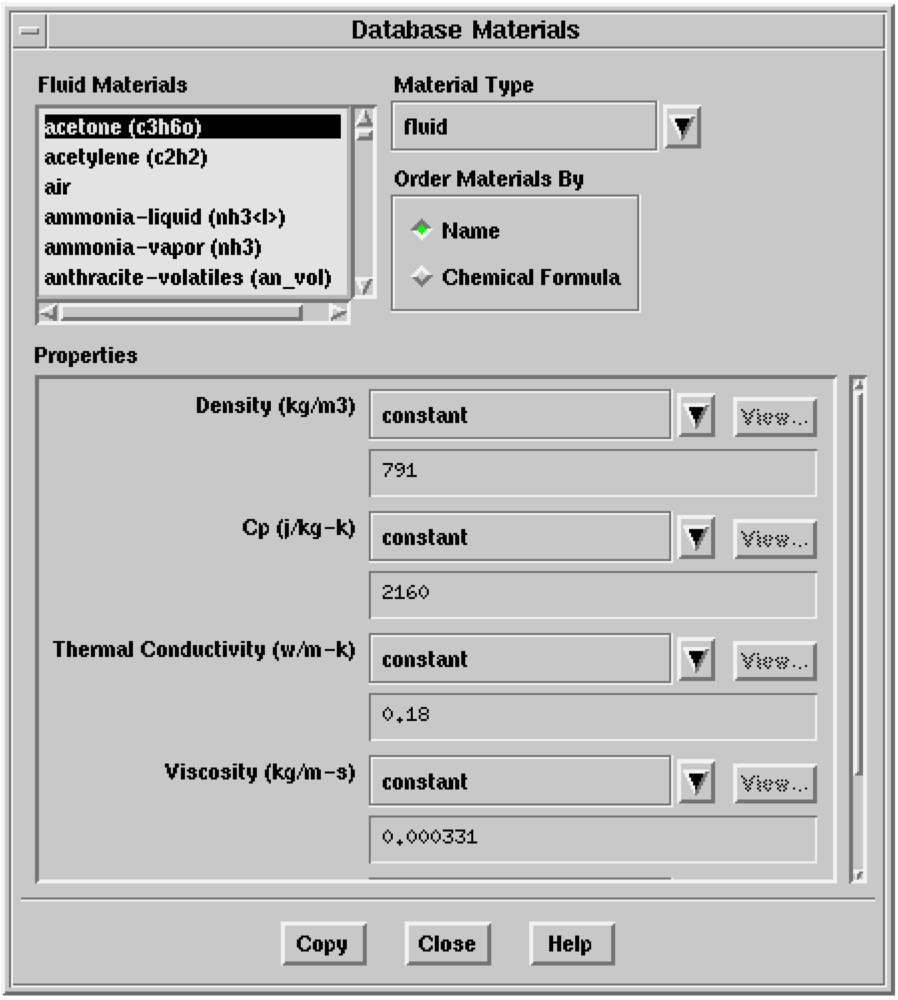


Figure 1: 数据库材料面板

2. 在材料类型下拉列表中选择材料类型（流体、固体等）。
3. 在材料列表中选择需要复制的材料（第二步已经选择了材料类型）。材料的属性会显示出来。
4. 如果要检查材料的属性，你可以用滚动条来选择。对于有些属性，除了常数值之外还有温度相关函数。你可以选择某一函数类型，相关的参数就会显示出来。你不可以编辑这些值，但是这个面板所显示的的函数和你所设定的温度相关函数是一样的，详细的内容可以参阅，使用温度相关函数定义属性一节。
5. 点击复制按钮。这些属性就从数据库中复制到当前列表中了，所有复制的属性也会在材料面板中显示出来。
6. 遵循相同的步骤复制或者关闭材料数据库面板。

从数据库复制完材料之后，你可以修改它的属性和名字，而不影响原来数据库的材料属性。

创建新材料

如果数据库中没有你所要使用的材料，你可以简单的为当前列表创建材料。步骤如下：

1. 在材料类型下拉菜单中选择类型（流体、固体等）。在流体、固体或其它材料中选什么材料都没关系。

2. 在名字框中输入材料名。
3. 在属性区域设定材料属性，属性太多可以用滚动条。
4. 点击改变/创建按钮。弹出问题框询问你是否覆盖原来的属性。点击 No 保留原来的材料并将新的材料加到列表中。此时会要求你输入新材料的分子式。如果已知，输入分子式并点击 OK 否则保留空白并点击 OK。此时材料面板会更新，并在流体材料（固体材料等）列表中显示出新材料的名字和分子式。

保存材料和属性

当前列表的所有材料及相关属性会保存在 case 文件中，在新的进程中所有的材料和属性都可以使用。

删除材料

如果有些材料你不想使用了，你可以删除它们，步骤如下：
1. 在材料类型下拉列表中选择材料类型（流体、固体等）。
2. 在材料列表中选择要删除的材料。（列表名字和你在第一步中选择的材料类型相同）
3. 点击 Delete 按钮。

在当前表中删除材料对全局数据库中的材料没有影响。

改变材料列表的顺序

数据库中的材料列表的顺序默认是按名字排列。你可以选择按化学分子是排列，此时你可以在排列材料框中选择化学分子式选项。如：air、co2、o。改回去请点击名字选项。

注意：材料面板和数据库面板中材料的排序是相互独立的。你可以在数据库中按分子式排列，在当前列表中按名字排列，每一个面板都有自己的排列选项。

使用温度相关函数定义属性

材料属性可以定义为温度相关函数，如：你可以定义温度的多项式、分段线性或者分段多项式函数：

多项式：

$$\phi(T) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$

分段线性

$$\phi(T) = \phi_n + \frac{\phi_{n+1} - \phi_n}{T_{n+1} - T_n}(T - T_n)$$

其中：$1 \le n \le N$，N 为所分的段数。

分段多项式:

$$for \quad T_{\min,1} < T < T_{\max,1} : \phi(T) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$
$$for \quad T_{\min,2} < T < T_{\max,2} : \phi(T) = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 + \ldots$$

在上面的方程中，f 为属性。

注意：如果是温度的多项式函数或者分段多项式函数，其中的温度单位是 Kelvin 或者 Rankine。如果你使用 Celsius 或者 Kelvin 作为温度单位，相应的多项式系数也要根据 Kelvin 单位改变，如果使用 Fahrenheit 或者 Rankine 作为温度单位，相应的只要根据 Rankine 单位改变。

有一些属性有附加的函数，还有一些我们所用的只是这三个函数的子集。决定使用哪一个温度相关函数请参阅相关章节。

本节会讨论定义多项式函数、分段线性函数和分段多项式函数所需要的输入。

多项式函数需要的输入

定义材料属性的温度相关多项式函数步骤如下：

1. 在使用材料面板的 1 中，在属性名字（如：density）右边的下拉菜单中选择多项式。会打开如下的多项式轮廓面板。(因为这只是模式面板，所以，在进行以下步骤之前解算器不允许你做其它的任何事情)。

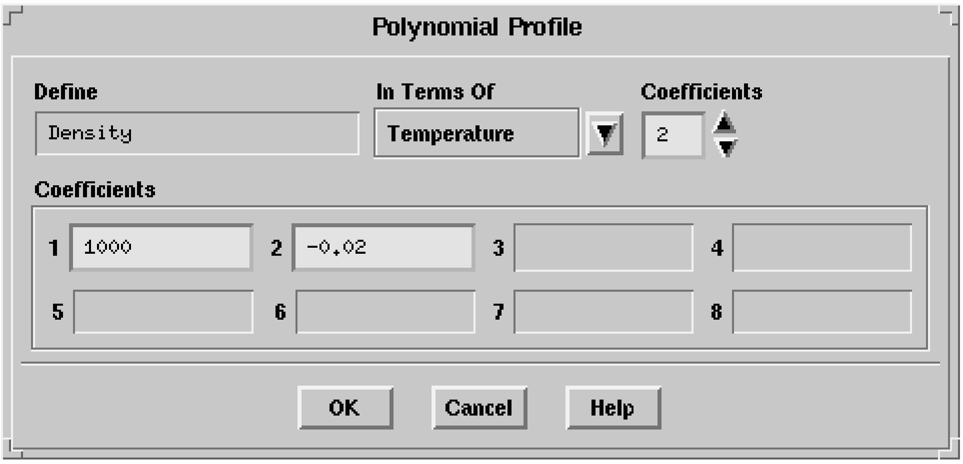


Figure 1: 多项式轮廓面板

2. 指定系数的数量（最多为 8 个）。系数的数量定义了多项式的阶数。默认的数量为一，也就是零阶多项式：属性为常值且等于唯一的系数 A_1；输入二则定义一阶多项式：属性随温度呈线性变化，如此等等。
3. 定义系数。系数 1, 2, 3,... 和使用温度相关函数定义属性中的方程 1 的 A_1,A_2, A_3,... 是一致的。上图的面板对应的就是下面的函数：

$$\rho(T)=1000-0.02T$$

需要注意温度的单位限制！

分段线性函数所需要的输入

定属性的温度分段线性函数步骤如下：

1. 在使用材料面板的 1 中，在属性名字（如：Viscosity）右边的下拉菜单中选择分段线性函数。会打开分段线性函数轮廓面板如下。(因为这只是模式面板，所以，在进行以下步骤之前解算器不允许你做其它的任何事情)。

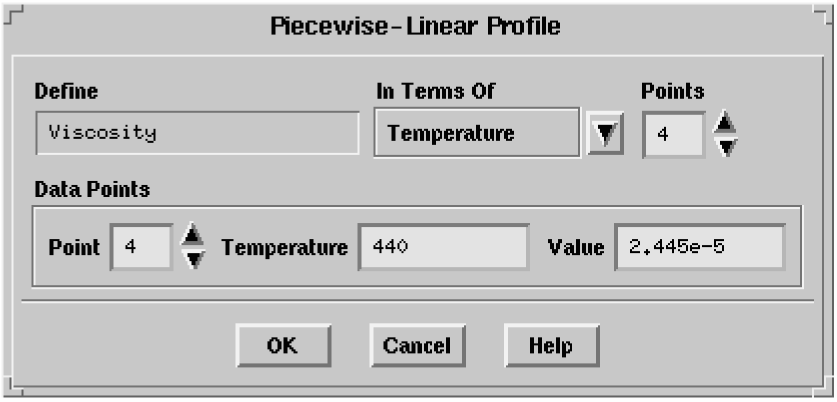


Figure 1: 分段线性轮廓面板

2. 定义分段的点数
3. 在数据点处输入每一个点的数据对，首先输入点 1 的无关和相关变量值，然后逐渐增加点的数目输入相关数值。所提供的点的数据对必须是按顺序的（随温度的增加而变化），解算器是不会为你分类的。每一个属性最大为 30 个分段点，下图是上面面板所描述的轮廓。

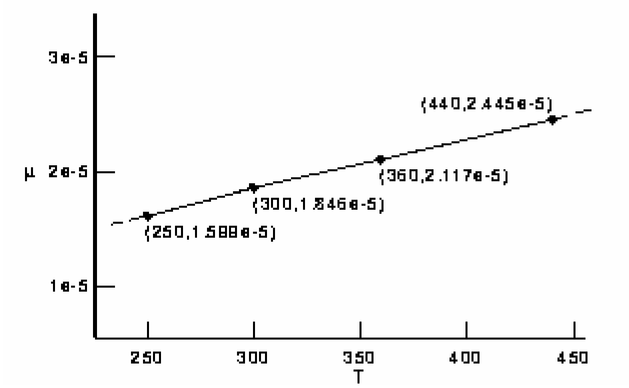


Figure 2: 粘性的分段线性定义 m (T)

分段多项式函数的输入

要定义材料属性的温度分段多项式函数，步骤如下：

1. 在使用材料面板的 1 中，在属性名字（如：Viscosity）右边的下拉菜单中选择分段多项式函数。会打开分段多项式函数轮廓面板如下。（因为这只是模式面板，所以，在进行以下步骤之前解算器不允许你做其它的任何事情）。

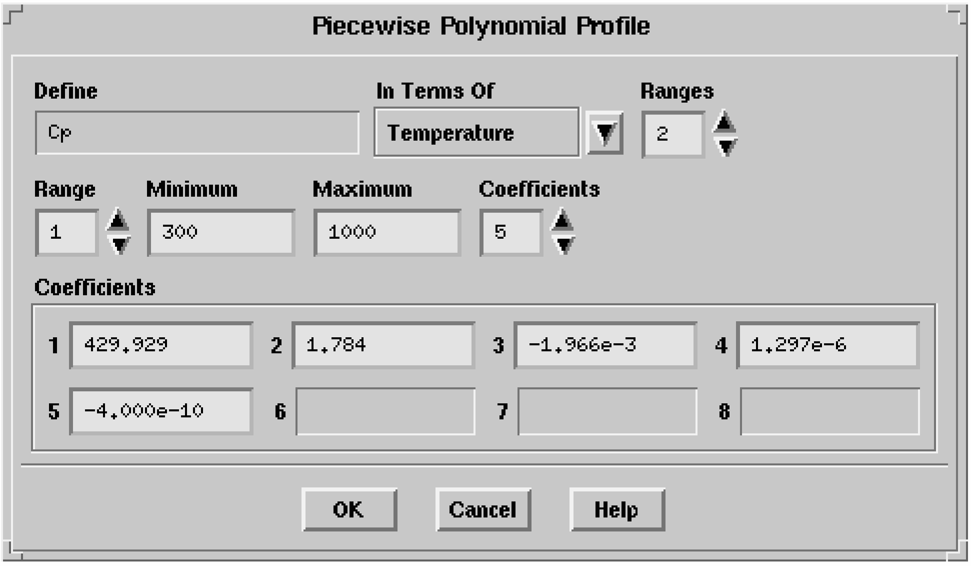


Figure 1: 分段多项式轮廓面板

2. 指定范围的数目，如方程 1，分两个范围如下：

$$for \quad 300 < T < 1000:$$

$$c_p(T) = 429.929 + 1.874T - 1.966\times10^{-3}T^2 + 1.297\times10^{-6}T^3 - 4.000\times10^{-10}T^4$$

$$for \quad 1000 < T < 5000:$$

$$c_p(T) = 841.377 + 0.593T - 2.415\times10^{-4}T^2 + 4.523\times10^{-8}T^3 - 3.153\times10^{-12}T^4$$

最多定义 3 个范围，范围的顺序也要使随着温度的增加而增加，解算器不会为你自动排序。

3. 对于第一个范围（Range = 1），指定最大和最小温度，以及系数的数目（最多为 8）。系数的数目定义了多项式的阶数。这和多项式的是一致的。
4. 定义系数，系数 1, 2, 3,... 和使用温度相关函数定义属性中的方程 5 的 A_1,A_2, A_3,... 是一致的。上图的面板对应的就是方程 1 的第一个范围。
5. 增加变量的范围输入相应的温度最大值、最小值、系数的数目以及相应的系数，如果有第三个范围重复上述步骤。

注意温度的单位限制，前面已经讨论了！

检查和修改已经存在的轮廓

如果你要检查和修改系数、数据对或者范围，请点击属性名字右边的编辑按钮，此时便会打开适当的面板供你检查和修改。

注意：在数据库材料面板你不能修改轮廓，但是你可以点击察看按钮来检查数据。

自定义材料数据库

材料数据库在 Path/Fluent.Inc/fluent5.x/cortex/lib/propdb.scm 文件中。其中 Path 是 FLUENT 安装目录，x 为相关版本，如 fluent5.0，x 就为 0。

如果你想将常用的材料增加到材料数据库，步骤如下：

1. 将上述目录的 propdb.scm 文件复制到当前的工作目录。

2. 使用文本编辑器，按照下面的格式增加其它材料。如果你所要定义的材料和已有的材料相似，你可能要复制已有的材料，然后改变它的名字。空气和铝的相关条目如下：

```
(air
   fluid
   (chemical-formula . #f)
   (density (constant . 1.225)
   (premixed-combustion 1.225 300))
   (specific-heat (constant . 1006.43))
   (thermal-conductivity (constant . 0.0242))
   (viscosity (constant . 1.7894e-05)
   (sutherland 1.7894e-05 273.11 110.56)
   (power-law 1.7894e-05 273.11 0.666))
   (molecular-weight (constant . 28.966))
)
(aluminum
   (solid)
   (chemical-formula . al)
   (density (constant . 2719))
   (specific-heat (constant . 871))
   (thermal-conductivity (constant . 202.4))
   (formation-entropy (constant . 164448.08))
)
```

当你在当前工作目录下的 FLUENT 进程中进行下一次加载材料数据库时。FLUENT 会加载你所修改的 propdb.scm 文件，而不是原来数据库的文件，此时你所定义的材料就会在数据库材料面板中可以得到了。

如果你想在其它情况下使用修改后的数据库，你可以将自定义的文件 propdb.scm 放到 cortex/lib 目录中，替换掉默认的数据库。在进行这项操作之前，你应该将原来的 propdb.scm 文件改个名字或者备份一下以便将来使用。

密度

FLUENT 为定义密度提供了几个选项：常数密度；温度相关和/或成分相关密度。本节描述了每一个输入选项和控制物理模型。在所有的情况下，你都要用使用材料面板中的 1 来定义密度。菜单：Define/Materials...。

不同流动区域密度的定义

FLUENT 中密度的选择是非常重要的，你必须在流动区域的基础上设定适当的密度关系式 。

- 对于可压流，理想气体关系式式是适当的密度关系式。
- 对于不可压流你需要选择下面方法中的一种：
  1. 密度如果与温度无关，请选择常数。
  2. 对于完全不可压流中压力有很小的变化，但是你想要使用理想气体定律时来体现密度和温度之间的关系（如自然对流）时，你就应该使用不可压理想气体定律。不可

也理想气体定律不能计算封闭区域的时间相关自然对流。

3. 当密度是温度的函数时（如自然对流问题），我们就应该使用温度的多项式函数、分段线性函数或者分段多项式函数。
4. 对于温度有很小变化的自然对流问题，可以使用 Boussinesq 模型。

多重区域模型的混合密度关系式

如果模拟的是使用不同材料的多重流体区域，你需要注意如下问题：

- 对于分离解算器，可压理想气体定律不能和其它密度方法混合使用。这就意味着如果某一材料使用可压理想气体定律，那么其它所有的材料也必须使用可压理想气体定律。需要注意的是，耦合解算器不受该限制。
- 只有一个指定的操作压力和一个指定的操作温度。这就意味着如果你对不止一种材料使用理想气体定律，它们会共用相同的操作压力；如果你对不止一种材料使用 Boussinesq 模型，它们就会共用相同的操作温度。

常数密度的输入

要定义常数密度，请选择使用材料面板中的 1 密度右边的下拉菜单检查常数，并输入材料的密度值。对于默认流体（空气）密度为 1.225 kg/m^3。

Boussinesq 近似所需要的输入

要激活密度的 Boussinesq 近似，选择使用材料面板中的 1 密度右边的下拉菜单中的 Boussinesq，并为密度制定常数值。你还要设定温度膨胀系数以及相关的操作条件，详细内容请参阅 Boussinesq 模型一节。

密度定义为温度的轮廓函数

如果你模拟包含热传导的问题，你可以定义密度为温度的函数，共有三种类型：

分段线性：

$$\rho(T)=\rho_n+\frac{\rho_{n+1}-\rho_n}{T_{n+1}-T_n}(T-T_n)$$

分段多项式：

$$for \quad T_{\min,1}<T<T_{\max,1}:\rho(T)=A_1+A_2T+A_3T^2+\dots$$
$$for \quad T_{\min,2}<T<T_{\max,2}:\rho(T)=B_1+B_2T+B_3T^2+\dots$$

多项式：

$$\rho(T)=A_1+A_2T+A_3T^2+\dots$$

这些方法的输入，首先在密度右边的下拉菜单中选择分段线性、分段多项式或者多项式，其余操作请参阅前面所介绍的使用温度相关函数定义属性一节。

不可压理想气体定律

在 FLUENT 中，对于不可压流如果使用理想气体定律来定义密度，密度的计算式为：

$$\rho = \frac{p_{op}}{RT}$$

其中 R 为普适气体常数，p_op 为你在操作压力面板定义的操作压力。在这种情况下，密度只与操作压力相关而与当地压力场无关。

不可压理想气体所需要的密度输入：

1. 在使用材料面板一节 1 中的密度右边的下拉列表中选择不可压理想气体来激活不可压流体的理想气体定律。你必须对每一个所使用的材料分别指定不可压理想气体定律。对于混合物的理想气体定律指定的信息请参阅多组分混合物的组分相关密度一节。
2. 在操作条件面板中的定义操作压力框中设定操作压力。菜单：Define/Operating Conditions...。需要注意的是当你计算理想气体定律的密度时操作压力的输入是很重要的。详情请参阅操作压力一节中关于设定操作压力适当值的建议。操作压力默认为 101325 Pa。
3. 如果不解化学组分输运方程，请设定同质或者单组分的分子量，或者对与多组分混合物设定每一种流体材料的分子量。对于每一种材料，请在使用材料面板中的 1 中输入分子量的值。

可压流动的理想气体定律

对于可压流，气体定律的形式为：

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{RT}$$

其中 p 为 FLUENT 所预测的当地相对（或标准）压力，p_op 是你在操作压力条件面板中定义的操作压力。

可压流理想气体定律的密度输入：

1. 在使用材料面板一节 1 中的密度右边的下拉列表中选择理想气体来激活不可压流体的理想气体定律。你必须对每一个所使用的材料分别指定理想气体定律。对于混合物的理想气体定律指定的信息请参阅多组分混合物的组分相关密度一节。
2. 在操作条件面板中的定义操作压力框中设定操作压力。菜单：Define/Operating Conditions...。需要注意的是当你计算理想气体定律的密度时操作压力的输入是很重要的。绝对静压等于可压流动理想气体定律的方程 1 中的操作压力加上解算器所计算的相对压力。详情请参阅操作压力一节中关于设定操作压力适当值的建议。操作压力默认为 101325 Pa。
3. 如果不解化学组分输运方程，请设定同质或者单组分的分子量，或者对与多组分混合物设定每一种流体材料的分子量。对于每一种材料，请在使用材料面板中的 1 中输入分子量的值。

多成分混合的成分相关密度

如果你解组分输运方程，你就需要为混合材料和流体成分（组分）设定相关属性，详情请参

阅混合物与其流体成分（组分）的属性的定义。要定义混合物的组分相关密度，步骤如下：

1. 选择密度方法：

- 对于非理想其体混合物，在使用材料面板的 1 中的密度右边下拉列表中选择混合材料的 volume-weighted-mixing-law 方法。
- 如果你模拟可压流动，在使用材料面板的 1 中的密度右边下拉列表中选择混合材料的理想气体。
- 如果使用理想气体定律模拟不可压流动，在使用材料面板的 1 中的密度右边下拉列表中选择混合材料的不可压理想气体。

2. 点击改变/创建按钮。
3. 如果你选择 volume-weighted-mixing-law，定义组成混合物的每一种流体材料的密度。你可以为每一个组分定义常数或者（适当的情况）温度相关密度。

如果所计算的是非理想气体混合物，FLUENT 以下面公式计算混合气体的密度

$$\rho = \frac{1}{\sum_{i'} \frac{m_i'}{\rho_i'}}$$

其中 m_i'是质量分数，r_i'是组分 i'的密度。

对于可压流理想气体定律的形式为：

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{RT \sum_{i'} \frac{m_i'}{M_i'}}$$

其中 p 是由 FLUENT 预测的当地相对（或标准）压力，R 是普适气体常数，m_i^'是组分 i^'的质量分数，M_i^'是组分 i^'的分子量，p_op 是在操作条件面板中的操作压力框中定义的操作压力。

如果所计算的是不可压流动的理想气体定律的密度，FLUENT 以下面公式计算混合气体的密度：

$$\rho = \frac{p_{op}}{RT \sum_{i'} \frac{m_i'}{M_i'}}$$

其中 R 是普适气体常数，m_i^'是组分 i^'的质量分数，M_i^'是组分 i^'的分子量，p_op 是在操作条件面板中的操作压力框中定义的操作压力。在这种形式中，密度只与操作压力有关而与当地相对压力无关。

粘性

FLUENT 提供了几种定义流体粘性的选项：

- 常数粘性
- 温度和/或组分相关粘性
- 分子运动论
- 非牛顿粘性

- 自定义函数

本节描述了上述每一个输入选项和控制物理模型（自定义函数将在自定义函数一章中介绍）。在所有的情况下你都需要在使用材料面板中的 1 种定义粘性。菜单：Define/Materials...。

FLUENT 中粘性的输入是动力学粘性 m，国际标准单位为 kg/m-s，英制单位为 lbm/ft-s。FLUENT 不需要输入运动学粘性系数 n。

常数粘性所需要的输入

如果你想定义流体的粘性为常数，请在使用材料面板一节中的 1 的粘性右边的下拉列表中选择常数，然后输入流体的粘性值。对于默认流体——空气，其粘性默认为 1.7894 ?10^-5 kg/m-s。

作为温度函数的粘性

如果你所模拟的问题包括热传导，你可以将粘性定义为温度的函数。FLUENT 共提供了 5 种类型的函数：

- 分段线性：

$$\mu(T) = \mu_n + \frac{\mu_{n+1} - \mu_n}{T_{n+1} - T_n}(T - T_n)$$

- 分段多项式：

$$for \quad T_{\min,1} < T < T_{\max,1} : \mu(T) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$
$$for \quad T_{\min,2} < T < T_{\max,2} : \mu(T) = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 + \ldots$$

- 多项式：

$$\mu(T) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$

- Sutherland 定律
- 幂律

需要注意的是，幂率粘性定律一节中的幂率和非牛顿流体的的粘性一节中的非粘性幂率是不同的。

对于前三个的任何一个，请在粘性右边的下拉列表中选择分段线性、分段多项式或者多项式。然后输入数据对(T_n , m_n)，范围以及系数，或者使用材料面板中的 1 所描述的这些函数的系数。详情请参阅使用温度相关函数定义属性一节。对于 Sutherland 定律或者幂率，在下拉列表中选择 sutherland 或者幂率然后输入这两个定律相应的参数。

Sutherland 粘性定律

Sutherland (1893)由动力学理论所推出的 Sutherland 粘性定律使用理想化的分子见作用力势函数。公式是由二或三系数指定。

二系数的 Sutherland 定律为

$$\mu = \frac{C_1 T^{3/2}}{T + C_2}$$

其中粘性的单位为 kg/m-s，温度的单位为 K，C_1 和 C_2 是系数。对于在适度的温度和压力下的空气，C_1 = 1.458 ?10^-6 kg/m-s-K^1/2，C_2 = 110.4 K.

三系数的 Sutherland 定律为：

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S}$$

其中 m 是粘性，单位为 kg/m-s，T 是静温，单位为 K，m_0 是参考值，单位为 kg/m-s, T_0 是参考温度，单位为 K，S 是有效的温度，单位是 K，被称为 Sutherland 常数，它是气体所特有的。对于适当的温度和压力：m_0 = 1.716?10^-5 kg/m-s，T_0 = 273 K，S = 111 K。

要使用 Sutherland 定律，请在粘性右边的下拉列表中选择 sutherland，此时 Sutherland 定律面板就会打开，你可以遵照如下步骤输入系数：

1. 选择二系数或者三系数方法。需要注意的是，二系数方法必须使用国际标准单位。
2. 对于二系数方法，设定 C1 和 C2 即可。对于三系数方法，设定参考粘性 m_0，参考温度 T_0 以及有效温度 S。

幂律粘性定律

稀释气体粘性的另一个常用的近似方法是幂率形式。对于是当温度的稀释气体，这一形式比 Sutherland 定律的精度稍差一点。
二系数的幂率粘性定律形式为：

$$\mu = BT^n$$

其中 m 是粘性，单位为 kg/m-s，T 是静温，单位为 K，B 是无量纲系数。对于适当温度和压力的空气，B = 4.093?10^-7，n = 2/3。

三系数的幂率粘性定律的形式为：

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n$$

其中 m 是粘性，单位为 kg/m-s，T 是静温，单位为 K，m_0 是参考值，单位为 kg/m-s。对于适当压力和温度的空气，m_0 = 1.716?10^-5 kg/m-s，T_0 = 273 K，n = 2/3。
粘性的非牛顿幂率在非牛顿流体的粘性一节中描述。
要使用幂率模型，请在粘性右边的下拉列表中选择幂率。此时会打开幂率面板，然后你就可以按下面的步骤输入系数值：

1. 选择二系数或者三系数方法。需要注意的是，二系数方法必须使用国际标准单位。
2. 对于二系数方法，设定 B 和温度指数 n。对于三系数方法，设定参考粘性 m_0，参考温度 T_0 以及温度指数 n。

用分子运动论定义粘性

如果你使用气体定律（见密度一节所述），你可以选择使用分子运动论定义流体粘性：

$$\mu = 2.67 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

其中粘性 m 的单位是 kg/m-s，T 的单位为 Kelvin，s 的单位是埃，W_m = W_m (T^*)以及

$$T^* = \frac{T}{(\varepsilon/k)}$$

请在使用材料面板一节中的 1 的粘性右边的下拉列表中选择分子运动论来提供分子运动论的计算，它需要输入 Lennard-Jones 参数 s 和 e/k。解算器会使用方程 1 种输入的这些分子运动论参数来计算流体粘性。详情请参阅分子运动论参数一节所介绍的输入。

多组分混合物的组分相关粘性

如果你所模拟的流动包含不止一种化学组分（多组分流动），你可以选择定义组分相关粘性。需要注意的是混合物粘性的定义既可以是常数值也可以是温度的函数。

定义混合物的组分相关粘性，步骤如下：

1. 对于混合材料，在粘性右边的下拉列表中选择 mass-weighted-mixing-law，如果使用密度的理想气体定律，选择 ideal-gas-mixing-law。
2. 点击改变/创建按钮。
3. 定义组成混合物的每一个流体材料的粘性。你可以分别为每一个组分定义常数或者温度相关粘性。还可以使用分子运动论来定义每一组分的粘性，如果需要的话还可以指定非牛顿粘性。

如果你使用理想气体定律，解算器就会在分子运动论的基础上计算混合物的粘性：

$$\mu = \sum_{i'} \frac{X_{i'} \mu_{i'}}{\sum_{i'} X_{i'} \phi_{i'j'}}$$

其中：

$$\phi_{i'j'} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_{i'}}{\mu_{j'}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_{j'}}{M_{i'}}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^2}{\left[8\left(1 + \frac{M_{i'}}{M_{j'}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}}$$

其中 X_i^'是组分 i^'的摩尔百分比。

对于非理想气体混合物，粘性的计算是基于单组分粘性所取的平均值：

$$\mu = \sum_{i'} m_{i'} \mu_{i'}$$

非牛顿流体的粘性

对于牛顿流来说，剪应力和剪切速度成比例：

$$\tau = \mu\dot{S}$$

其中：

$$\dot{S} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

m 是粘性，它与 S(dot)无关。

对于非牛顿流来说，粘性是 S(dot)的函数，并由变量 h 所描述：

$$\tau = \left[\eta\left(\dot{S}\right)\right]\dot{S}$$

FLUENT 提供了两种模拟非牛顿流的选项：

- 幂率
- 仿塑胶（pseudo-plastics）的 Carreau 模型。

需要注意的是，非牛顿流体的的粘性一节中的非粘性幂率和幂率粘性定律一节中的幂率是不同的。

对于这些模型的参数的输入，你可以查阅相关文献（如[161]）。

非牛顿流体粘性系数的幂律：

$$\tau = ke^{\frac{T_0}{T}}\dot{S}^n = \left(ke^{\frac{T_0}{T}}\dot{S}^{n-1}\right)\dot{S}$$

等价为：

$$\tau = ke^{\frac{T_0}{T}}\dot{S}^{n-1}$$

FLUENT 还允许你设置幂率函数的上下限，产生如下方程：

$$\eta_{\min} < \eta = ke^{\frac{T_0}{T}}\dot{S}^{n-1} < \mu_{\max}$$

其中 k，n，T_0，h_min 和 h_max 为输入参数。K 是流体（一致的指数）平均粘性的度量，n 是偏离牛顿流体的度量（幂率指数），具体请见下文，T_0 是参考温度，h_min 和 h_max 分别为幂率的下限和上限。如果从幂率模型计算出的粘性超出了上下限 h_max 和 h_min 会分别取代超出上限和下限的值。Figure 1 所示为低速或高速剪切流动中 h_min 和 h_max 是如何限制粘性的。

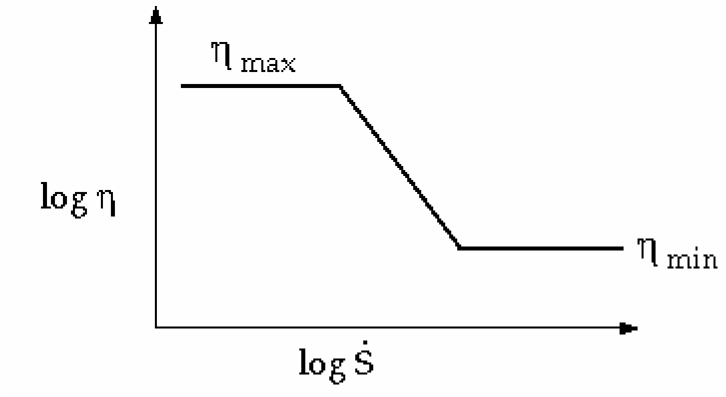


Figure 1: 根据牛顿幂率模型所得到的粘性和剪切速度变化关系

N 的值决定了流体的类别：

n = 1　　牛顿流体

n > 1　　剪切增厚过程（膨胀流体）

n < 1　　剪切变薄过程（仿塑胶流体）

要使用非牛顿幂率定率，请在粘性右边的下拉列表中选择非牛顿幂率。此时非牛顿幂率面板就会打开，你可以输入一致的指数 k，幂率指数 n，参考温度 T_0，最小粘性 h_min 以及最大粘性 h_max。

仿塑胶的 Carreau 模型

非牛顿粘性的幂率模型一节所描述的幂率模型给出粘性和剪切速度的变化关系为：

$$\tau = \left[\eta\left(\dot{S}\right)\right]\dot{S} = \left(ke^{\frac{T_0}{T}}\dot{S}^{n-1}\right)\dot{S}$$

对于 $\dot{S} \to 0, \eta \to 0$ 以及 $\dot{S} \to \infty, \eta \to \infty$，其中 η_0 和 η_∞ 分别为流体粘性的上下限。

Carreau 模型尝试模拟大范围的流体流动，它使用曲线拟和将牛顿流体和剪切变薄(n < 1)非牛顿流体定律整合在一起。在该模型中，粘性为：

$$\eta = \eta_\infty + \left(\eta_0 - \eta_\infty\right)\left[1 + \left(\lambda e^{\frac{T_0}{T}}\dot{S}\right)^2\right]^{(n-1)/2}$$

其中参数 n，l，T_0，η_0，和 η_∞ 和流体有关。L 是时间常数，n 是幂率指数（请参阅非牛顿粘性的幂率一节所述的内容），T_0 为参考温度，η_0 和 η_∞ 分别为 0 和无穷剪切粘性。下图所示为在低和高剪切速度情况下粘性如何被 η_0 与 η_∞ 所限制：

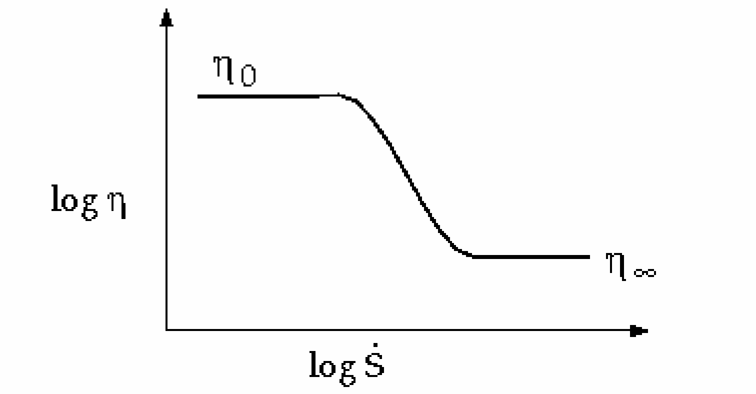


Figure 1: Carreau 模型中粘性和剪切速度的变化关系

要使用 Carreau 模型，在粘性右边的下拉列表中选择 carreau。然后便可以打开 Carreau 模型面板，此时你就可以输入时间常数 l，幂率指数 n，参考温度 T_0，零剪切粘性η_0以及无穷剪切粘性η_∞。

热传导系数

当考虑热传导时，必须定义热传导系数。模拟能量和粘性流动时你需要定义热传导系数。

FLUENT 提供了几种定义热传导系数的方法：

- 常数热传导系数
- 温度和/或组分相关热传导系数
- 分子运动论
- 自定义函数
- 各向异性/正交（只对固体材料）

本节详细地介绍了每一个选项的输入和控制模型（自定义函数将会在自定义函数一章介绍）。在所有的情况下你都要在使用材料面板一节中的 1 的热传导系数项中定义。菜单：Define/Materials...。

所定义的热传导系数国际标准单位是 W/m-K，英制单位是 BTU/hr-ft-R。

常数热传导系数的输入

如果要定义常数热传导系数请在使用材料面板一节中的 1 的热传导系数右边的列表中选择常数，然后输入热传导系数的值。

对于默认流体空气来说，其热传导系数默认为 0.0242 W/m-K。

作为温度函数的热传导系数

你还可以定义热传导系数为温度的函数，FLUENT 共提供了三种类型的函数：

- 分段线性

$$k(T) = k_n + \frac{k_{n+1} - k_n}{T_{n+1} - T_n}(T - T_n)$$

- 分段多项式

$$for \quad T_{\min,1} < T < T_{\max,1} : k(T) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$
$$for \quad T_{\min,2} < T < T_{\max,2} : k(T) = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 + \ldots$$

- 多项式

$$k(T) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$

你可以输入数据对（T_n，k_n），范围和系数 A_i 与 B_i，或者在使用材料面板 1 中的这些函数的系数 A_i，详细内容清参阅使用温度相关函数定义属性一节。

使用分子运动论定义热传导系数

如果你使用气体定律（如密度一节所述），你可以用分子运动论定义热传导系数：

$$k = \frac{15}{4}\frac{R}{M}\mu\left[\frac{4}{15}\frac{c_p M}{R} + \frac{1}{3}\right]$$

其中 R 是普适气体常数，M 是分子量，m 所指定的或计算的材料的粘性，c_p 所指定的或计算得到的材料的热容。
要用这个方程来计算热传导系数请在使用材料面板一节中的 1 的热传导系数右边的下拉列表中选择分子运动论。解算器就会使用上面的方程来计算热传导系数。

多组分混合物的组分相关热传导系数

如果所模拟的流动包含不止一种化学组分（多组分流动），你可以选择定义组分相关热传导系数。在这种情况下你还可以定义热传导系数为常数、温度的函数或者使用分子运动论来定义。
要定义某一混合物的组分相关热传导系数，步骤如下：

1. 对于混合材料，选择 mass-weighted-mixing-law，如果你使用理想气体定律，请在热传导系数右边的下拉列表中选择 ideal-gas-mixing-law。如果你使用 ideal-gas-mixing-law 计算混合物的热传导系数，你必须使用 ideal-gas-mixing-law 或者 mass-weighted-mixing-law 计算粘性，这是因为只有这两种方法计算出的粘性用于指定组分的粘性，这里的热传导系数正是组分的热传导系数。
2. 点击改变/创建按钮。
3. 为组成混合物的每一个材料定义热传导系数。你可以分别为每一个组分定义常数或者（需要的话）温度相关函数。你还可以使用分子运动论来定义每一组分的热传导系数

如果你使用理想气体定律，解算器会在分子运动论的基础上计算混合物的热传导系数：

$$k = \sum_{i'} \frac{X_{i'} k_{i'}}{\sum_{i'} X_{i'} \phi_{i'j'}}$$

其中：

$$\phi_{i'j'} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_{i'}}{\mu_{j'}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_{j'}}{M_{i'}}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^2}{\left[8\left(1 + \frac{M_{i'}}{M_{j'}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}}$$

其中 X_i^'是组分 i^'的摩尔百分比。.

对于非理想气体，混合物的热传导系数是各组分的热传导系数的简单的质量平均：

$$k = \sum_{i'} m_{i'} k_{i'}$$

固体的各向异性热传导系数

FLUENT 中各向异性热传导系数选项解决固体的热传导方程时，所使用的热传导系数被指定为一个矩阵。热流量为：

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

由两个选项：正交和一般各向异性。

需要注意的是，各向异性热传导系数只在分离结算器中使用，它不可以用在耦合解算器中。

正交各向异性热传导系数

当使用证交热传导系数时，需要指定主轴方向(e(hat)_x,e(hat)_h,e(hat)_z)上的热传导系数(k_x,k_h,k_z)。热传导矩阵由下式计算：

$$k_{ij} = k_\xi e_{\xi i} e_{\xi j} + k_\eta e_{\eta i} e_{\eta j} + k_\zeta e_{\zeta i} e_{j\zeta}$$

要定义正交热传导系数，请在材料面板中热传导系数右边的下拉列表中选择正交。然后打开正交热传导系数面板（如下图）

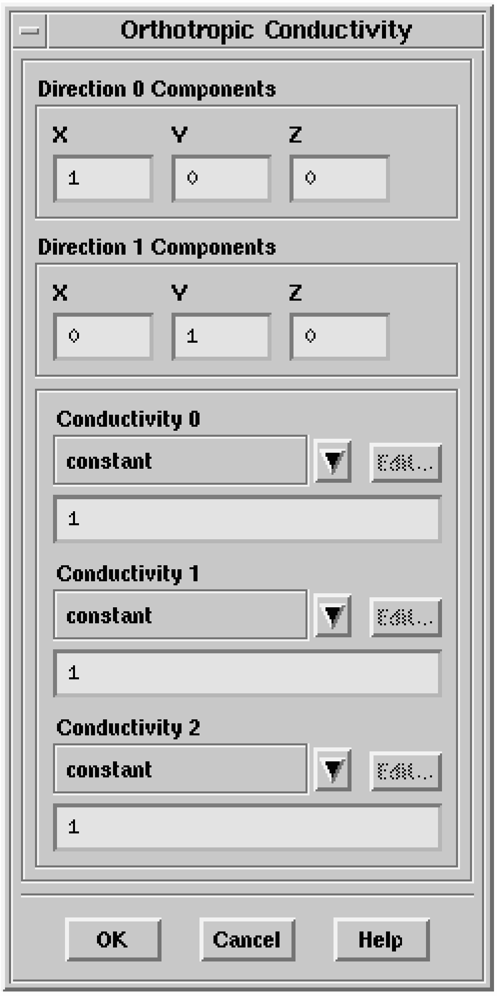


Figure 1:正交热传导系数面板

因为主轴方向(e(hat)_x,e(hat)_h, e(hat)_z)是相互正交的，所以对于三维问题只需要指定两个方向。e(hat)_x 在 0 方向上用 X，Y，Z 定义，e(hat)_h 在 1 方向上用 X，Y，Z 定义。你可以在每一个热传导系数下面的下拉列表中定义热传导系数 0(k_x)、(k_h)和 2 (k_z)为常数、温度的分段线性函数或者分段多项式函数。（详细内容请参阅常数热传导系数和温度相关热传导系数的输入的相关章节）。

对于二维问题，只需要指定函数(k_x,k_h)和单位矢量(e(hat)_x)。

一般的各项异性热传导系数

热传导矩阵由下式指定：

$$k_{ij} = k\hat{e}_{ij}$$

其中 k 是热传导系数，e(hat)_ij 是矩阵（对于二维问题是 2×2 的矩阵，对于三维问题是 3×3 的矩阵。

要定义一般的各向异性热传导系数，请在材料面板中的热传导系数右边的下拉列表中选择各向异性。此时会打开各向异性热传导面板（下图）。

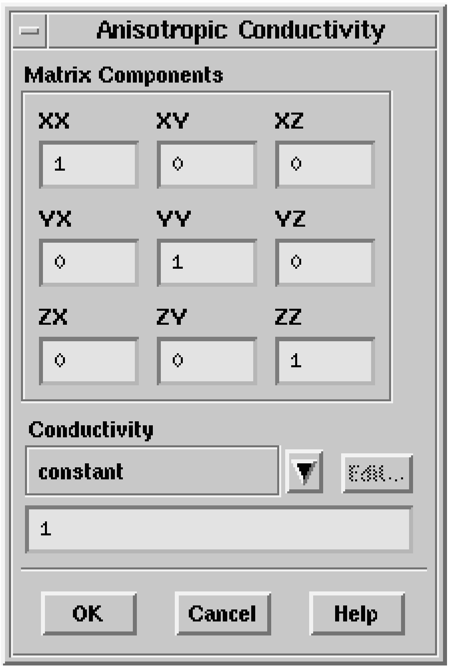


Figure 1:各向异性热传导面板

注意：e(hat)_ij 可以是非对称矩阵，你可以在各向异性热传导面板的矩阵分量中指定矩阵的各分量。K 可以指定为温度的函数或者其他常用的方法（常数、多项式、分段线性或分段多项式），这些都是从传导系数下面的下拉列表中选择得到的（详细内容请参阅常数热传导系数和温度相关热传导系数的输入的相关章节）　。

指定热容

当能量方程被使用时，必须指定热容。FLUENT 提供了几种定义热容的方法：

- 常数热容
- 温度和/或组分相关热容
- 分子运动论

本节详细地介绍了每一个选项的输入和控制模型（自定义函数将会在自定义函数一章介绍）。在所有的情况下你都要在使用材料面板一节中的 1 的 Cp 中定义。菜单：Define/Materials...。

指定热容的单位为国际标准单位的 J/kg-K 或者英制单位的 BTU/lbm-R。

注意：对于燃烧方面的应用，推荐使用温度相关方法指定热量。

指定热容所需要输入的常数

如果你要定义热容，请在使用材料面板一节中的 1 的 Cp 右边的下拉列表中选择常数并输入相应的热容值。

默认流体空气的热容默认为 1006.43 J/kg-K.

- 分段线性

$$c_p(T) = c_{p_n} + \frac{c_{p_{n+1}} - c_{p_n}}{T_{n+1} - T_n}(T - T_n)$$

- 分段多项式

$$for \quad T_{\min,1} < T < T_{\max,1} : c_p(T) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$

$$for \quad T_{\min,2} < T < T_{\max,2} : c_p(T) = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 + \ldots$$

- 多项式

$$c_p(T) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$

你可以输入数据对(T_n, c_p_n) 范围和系数 A_i 与 B_i，或者在使用材料面板 1 中的这些函数的系数 A_i，详细内容清参阅使用温度相关函数定义属性一节。

用分子运动论定义指定热容

如果你使用气体定律（如密度一节所述），你可以用分子运动论定义热容：

$$c_{p,i'} = \frac{1}{2}\frac{R}{M_{i'}}\left(f_{i'} + 2\right)$$

其中 f_i^'是气体组分 i^'的能量模式的数量（自由度），你可以在使用材料面板一节中的 1 的 Cp 右边的下拉列表中选择分子运动论。解算器就会使用上面的方程来计算热容。详情请参阅分子运动论的相关参数的输入。

指定热容为成分的函数

如果所模拟的流动包含不止一种化学组分（多组分流动），你可以选择定义组分相关热容。在这种情况下你还可以定义热容为常数、温度的函数或者使用分子运动论来定义。

要定义某一混合物的组分相关热容，步骤如下：

1. 对于混合材料，选择 Cp 右边的下拉列表中的 mixing-law。
2. 点击改变/创建按钮。
3. 为组成混合物的每一个材料定义热容。你可以分别为每一个组分定义常数或者（需要的话）温度相关函数。你还可以使用分子运动论来定义每一组分的热容

解算器会将混合物的热容定义为各组分的热容的质量平均：

$$c_p = \sum_{i'} m_i' c_{p,i'}$$

辐射属性

当你在 FLUENT 中使用，某种辐射模型，你就需要在使用材料面板一节中的 1 设定附加的属性：

- 对于 P-1 模型，你需要设定辐射吸收系数以及散射系数(P-1 模型方程中方程 1 的 a 和 s_s)。
- 对于 Rosseland 辐射模型，你也需要设定辐射吸收系数以及散射系数(P-1 模型方程中方程 3 的 a 和 s_s。
- 对于 DTRM，只需要设定吸收系数（DTRM 方程中方程 1 的 a。
- 对于 DO 模型，你需要设定辐射吸收系数以及散射系数（DO 方程中方程 1 的 a 和 s_s。。

除此之外，如果你模拟半透明介质，你可以指定折射指数（半透明壁面处 DO 模型的边界条件中的方程 3 中的 n_a 或者 n_b。注意：对于 DO 模型，你可以指定固体材料的辐射属性，从而在模拟半透明介质时可以用到它。

下面各结介绍了定义每一个属性的信息。

吸收系数

要定义吸收系数，你可以指定常值，温度相关函数（请参阅使用温度相关函数定义属性一节），组分相关函数或者自定义函数。如果你模拟 DO 辐射模型的非灰度（non-gray）辐射，你还可以选择在每一个灰度带指定常数吸收系数。
所需要的吸收系数的单位为 1/length。以及散射系数，它被定义为通过流体介质路径的每一单位长度上的辐射强度的变化。吸收系数可以用 CO_2 和 H_2O 发射率的列表计算，这一列表通常可以在辐射热交换的教科书等相关资料中得到。

常数吸收系数的输入

要定义常数吸收系数，请在使用材料面板一节中的 1 的吸收系数下面的框中输入数值（如果没有被选中，请首先在下拉列表中选择常数）

组分相关吸收系数的输入

FLUENT 还允许你输入组分相关吸收系数，它是水蒸气或者二氧化碳的当地质量分数的 a a 的函数。在燃烧模拟中，这些选项在模拟辐射时是非常有用的。FLUENT 所使用的 variable-absorption-coefficient 模型是模拟变化吸收系数一节中的 weighted-sum-of-gray-gases 模型(WSGGM)。要使用它请在使用材料面板一节中的 1 的吸收系数右边的下拉列表中选择 wsggm-cell-based、wsggm-domain-based 或者 wsggm-user-specified。三个 WSGGM 选项在计算路径长度上所使用的方法是不同的，详情请参阅组分相关吸收系数的输入一节。（一定要记住，你必须首先激活组分计算，这样才能在列表中看到 wsggm 选项，而且二氧化碳和水必须出现在混合物中。）

当 WSGGM 用于计算吸收系数时，你可以选择 Weighted-Sum-of-Gray-Gase 模型中方程 1 的路径长度 s 的计算方法。你可以使用特征单元尺寸或者平均光程（beam）长度（解算器计算出来的活着你所指定的）。具体哪种模型适合哪种方法请参阅变化吸收系数的模拟一节。

当你在上面所介绍的方法中选择了适当的吸收系数输入方法，你就需要选择路径长度方法了。

- 如果你选择 wsggm-cell-based，就需要使用 characteristic-cell-size 方法，以后也不需要输入其它内容。
- 如果你选择 wsggm-domain-based，a 的计算就需要使用 mean-beam-length 方法，而且 FLUENT 会在计算区域平均尺度的基础上计算平均光程，以后不需要输入其它内容。
- 如果你选择 wsggm-user-specified，就会使用 mean-beam-length 方法，但是你需要在 WSGGM 用户指定面板中的路径长度框中自己设定平均光程长的。当你选择 wsggm-user-specified 是这一面板会自动打开，因为这是一个（对话框等）模式上的面

板，所以你必须马上使用它。

非灰度辐射吸收系数的输入

如果你使用非灰度 DO 模型（请参阅非灰度 DO 模型理论与方程以及 DO 模型的非灰度辐射定义），你可以对灰度模型所使用的每一个带（band）指定不同的常数吸收系数。在吸收系数下拉列表中选择灰度带，然后在灰度带吸收系数面板中为每一个带定义吸收系数。需要注意的是，因为这是一个（对话框等）模式上的面板，所以你必须马上使用它。

烟尘和粒子对吸收系数的影响

如果你在离散相模型面板中打开粒子辐射相互作用选项，FLUENT 会考虑粒子对于吸收系数的影响（只对 P-1 和 DO 辐射模型来说）。

如果你要模拟烟尘的信息，并想考虑烟尘对于吸收系数的影响，请在烟尘模型面板中打开烟尘辐射作用的一般模型。只要你使用 WSGGM 来计算组分相关吸收系数，任何一个辐射模型都可以考虑烟尘的影响。

散射系数

散射系数默认为 0，并假定为各向同性的。你可以指定它为常值、温度相关函数（请参阅使用温度相关函数定义属性一节）或者自定义函数。你还可以指定非各向同性相函数。

散射系数的单位为 1/length。以及吸收系数，它被定义为通过流体介质路径的每一单位长度上的辐射强度的变化。你可能希望在出现微粒的燃烧系统中增加散射系数。

常数散射系数的输入

要定义常数散射系数，请在使用材料面板一节中的 1 的散射系数下面的框中输入数值（如果还没有选中，请首先在下拉列表中选择常数）。

散射相函数的输入

在默认的情况下，散射假定为各向同性，但是你可以指定线性各向异性散射函数。如果你使用 DO 模型，那么可以选择 Delta-Eddington 或自定义散射函数。

要模拟各向同性散射，请在散射相函数下拉列表中选择各向同性，不需要其它输入，这是 FLUENT 默认的情况。

要模拟各向异性散射，请在散射相函数下拉列表中选择各向异性，然后设定相函数系数的值（P-1 模型方程中方程 3 中的 C）。

要使用 Delta-Eddington 相函数，请在散射相函数下拉列表中选择 delta-eddington。此时会打开 Delta-Eddington 散射函数面板，在面板中你可以指定前向散射因子和对称因子（各向异性散射中的方程 1 的 f 和 C）。需要注意的是，因为这是一个（对话框等）模式上的面板，所以你必须马上使用它。

要使用自定义相函数，请在散射相函数下拉列表中选择自定义相函数。自定义相函数中必须指定各向异性散射方程 3 中的 F^*和 f。

折射指数

在默认的情况下，折射指数为 1。它只用于你使用 DO 模型模拟半透明介质。你可以在散射指数后面的得框中指定常数值。

辐射属性的报告

你可以在后处理面板中出现的变量选择下拉列表中的 Radiation...中使用吸收系数和散射系数来显示所计算的 a 和 s_s 的当地值。你还会在 Radiation…中发现折射指数。

质量扩散系数

层流质量扩散系数
湍流质量扩散系数
层流流动的 Fick 扩散定律
在多组分流动中，当你解组分输运方程时，需要质量扩散系数。质量扩散系数用于计算化学组分的扩散流量：

$$J_{i'} = -\rho D_{i',m} \frac{\partial m_{i'}}{\partial x_i}$$

其中 $D_{i,j}$ 是混合物中成分 i^'的扩散系数。

当混合物成分没有变化，即成分的 $D_{i,m}$ 无关时，上面的方程严格有效。因此，你不可以使用 FLUENT 计算层流流动的非稀释混合物的疏运。FLUENT 允许你以多种方法指定 $D_{i,m}$，包括 $D_{i,j}$，成分 i^'在 j^'中的二元质量扩散系数，但是 $D_{i,j}$ 并不是直接使用的，直接使用的是混合物的扩散系数，$D_{i,m}$ 由下式计算：

$$D_{i',m} = \frac{1 - X_{i'}}{\sum_{j', j' \neq i'} X_{j'} / D_{i'j'}}$$

其中 $D_{i,j}$ 时成分 i^'在 j^'中的二元质量扩散系数，X_i 是成分 i^'的摩尔百分数。你可以为每一个化学成分输入 $D_{i,m}$ 或 $D_{i,j}$，具体请参阅层流流动的质量扩散系数的输入。

湍流流动中扩散的计算

在湍流流动中，层流流动的 Fick 扩散定律的方程 1 由下式替代：

$$J_{i'} = -\left(\rho D_{i',m} + \frac{\mu_i}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_{i'}}{\partial x_i}$$

其中 Sc_t 是湍流流动的有效 Schmidt 数：

$$Sc_t = \frac{\rho D_t}{\mu_t}$$

D_t 是由湍流引起的有效质量扩散系数。

湍流流动的质量扩散系数需要输入如下内容：使用和层流流动相同的方法定义分子对扩散 $D_{i,m}$ 的贡献；附加的选项，来改变湍流 Schmidt 数的默认设定。如方程 3 所示，这些参数和具有涡粘性（m_t）的湍流所导致的有效质量扩散系数有关。

层流质量扩散系数的输入

在层流流动中，解算器使用层流流动的 Fick 扩散定律以及相关的输入（混合物成分 i^' 的扩散系数 $D_{i,m}$ ）来计算成分扩散。对于湍流流动，成分扩散使用湍流流动扩散计算中的方程 1 来计算。

你可以使用下面任意一种方法输入质量扩散系数：

- 除了在使用材料面板一节中混合成分列表最后一个字分的扩散系数 $D_{N,m}$ 设定为零之外，常数稀释近似为所有的 $D_{i,m}$ 定义为常数值。
- 稀释近似：定义每一个 $D_{i,m}$ （除了 $D_{N,m}$ 设定为零）为常数或者（如果要计算热传导的话）温度的多项式函数。
- 多成分方法：定义成分 i^'在每一个成分 j^'中的扩散系数 $D_{i,j}$ 为常数值或者温度的多项式函数，或者对于理想气体定律使用分子运动论来定义。

如果你模拟稀释混合物，其中在高浓度的输运流体中具有低质量分数的化学组分，你应该选择前两个方法输入 $D_{i,m}$ 。如果你模拟非稀释混合物，你可能希望定义每一个二元质量扩散系数 $D_{i,j}$ 。如果你选择定义 $D_{i,j}$ ，解算器会使用层流流动的 Fick 扩散定律中的方程 3 来计算混合物中组分 i^'的扩散。

你需要使用材料面板为每一个化学组分定义 $D_{i,m}$ 或者 $D_{i,j}$ 。菜单：Define/Materials...。

扩散系数的国际单位为 m^2/s，英制单位为 ft^2/s。

常数稀释近似输入

要使用常数稀释近似方法，步骤如下：

1. 在质量扩散系数右边的下拉列表中选择 constant-dilute-appx

2. 输入 $D_{i,m}$ 的唯一值。混合物的每一个组分的扩散系数都使用相同的值。

稀释近似输入

要使用稀释近似方法，步骤如下：
1. 在质量扩散系数右边的下拉列表中选择 dilute-approx
2. 在出现的质量扩散面板中（下图）的列表中选择你打算定义质量扩散系数的组分。

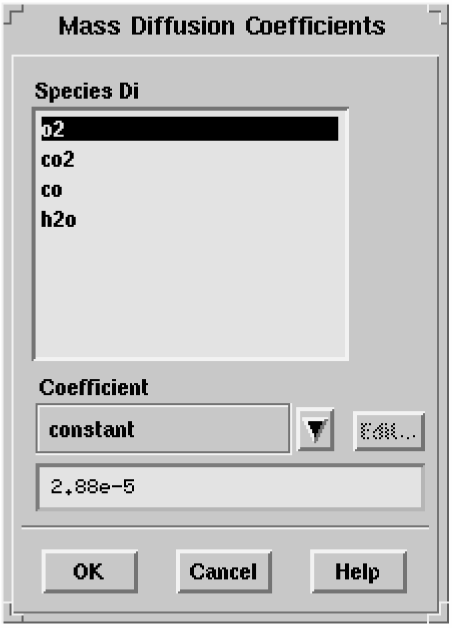


Figure 1: 稀释近似的质量扩散系数面板

3. 你可以定义所选组分的 $D_{i,m}$ 为常数值或者（如果存在热传导）温度的多项式函数：

- 要定义常数扩散系数，请在系数下面的下拉列表中选择常数（默认），然后在列表的下面输入数值。
- 要定义温度相关扩散系数，请在系数下拉列表中选择多项式，然后定义多项式系数（具体请参阅多项式函数的输入一节）。

$$D_{i',m} = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$

4. 重复 2 和 3 步，直到你将质量扩散面板中的 Di 列表中的所有组分的扩散系数定义完毕为止。

多成分方法输入

要使用多成分方法定义常数或者温度相关扩散系数，步骤如下：
1. 在质量扩系数右边的下拉列表中选择多成分。
2. 在出现的质量扩散面板中（下图）的列表中选择你打算定义质量扩散系数 $D_{i,j}$ 的组分 i' 和组分 j’（组分 i'在组分 j’中的系数）。

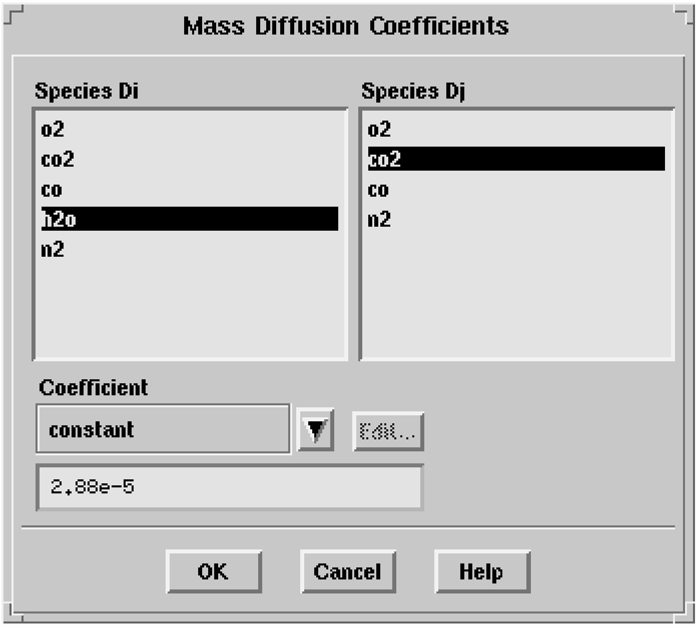


Figure 1:多成分方法的质量扩散系数面板

3. 你可以将所选的成对组分的 $D_{i,j}$ 定义为常数值或者温度的多项式函数（如果存在热传导）。
   - 要定义常数扩散系数，请在系数下面的下拉列表中选择常数（默认），然后在列表的下面输入数值。
   - 要定义温度相关扩散系数，请在系数下拉列表中选择多项式，然后定义多项式系数（具体请参阅多项式函数的输入一节）。

$$D_{i',j'} = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \ldots$$

4. 重复 2 和 3 步，直到你将质量扩散面板中的 Di 列表和 Dj 列表中的所有组分的扩散系数定义完毕为止。。

要使用多成分方法，并使用分子运动论（只在使用理想气体定律时可用）定义扩散系数，步骤如下：

1. 在质量扩散系数右边的下拉菜单中选择分子运动论
2. 完成混合材料的其它适当的定义之后点击改变/创建按钮。
3. 为每一个组分定义 Lennard-Jones 参数 s_i^'和(e/k)_i^'，详情请参阅分子运动论参数一节。解算器会使用分子运动论中的下面的公式计算扩算系数：

$$D_{i',j'} = 0.0188 \frac{\left[T^3 \left(\frac{1}{M_{i'}} + \frac{1}{M_{ji}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{p_{op} \sigma_{i',j'}^2 \Omega_D}$$

其中：W_D = W_D (T^*_D)，p_op 是系统的操作压力，

$$T_D^* = \frac{T}{(\varepsilon/k)_{i'j'}}$$

$$(\varepsilon/k)_{i'j'} = \sqrt{(\varepsilon/k)_{i'}(\varepsilon/k)_{j'}}$$

$$\sigma_{i'j'} = \frac{1}{2}(\sigma_{i'} + \sigma_{j'})$$

湍流流动中质量扩散系数的输入

当流动是湍流时，你需要定义 $D_{i,m}$ 或者 $D_{i,j}$，具体请参阅层流流动的质量扩散系数的输入一节，而且你还可以选择改变湍流流动中扩散系数的计算中所描述的湍流 Schmidt 数 Sc_t 的默认设定。

一般说来，在湍流流动中，质量扩散由湍流 Schmidt 数（湍流流动的扩散计算中的方程 3）决定的湍流输运控制。湍流 Schmidt 数规定了由于湍流而引起的质量和动量的相对扩散，它是在所有湍流流动中一致相似的。因为湍流 Schmidt 是与有分子组成的湍流属性相对不敏感的经验常数，所以对于任何组分你基本上没有理由修改默认值（0.7）。

假如你希望修改 Schmidt 数，你可以在粘性模型面板中输入新的湍流 Schmidt 数的值。菜单：Define/Models/Viscous...。

分子运动论需要的输入

标准状态焓

当你使用有限速度方法或者涡扩散模型解决反应流时，你需要定义每一组分 j^'的标准状态焓（焓的形式或者热的形式）h^0_j^'。这些输入用于定义混合焓：

$$H = \sum_{j'} m_{j'} \left[h_{j'}^0 + \int_{T_{ref,j'}}^{T} c_{p,j'} dT \right]$$

其中 T_ref,j^'是定义 h_j^'^0 时的参考温度。标准状态焓的国际标准单位是 J/kgmol 英制单位是 BTU/lbmol。

对于和反应相关的每一组分（即，每一个流体材料都包含在混合材料中），你可以在材料面板一节中的 1 的标准状态焓和参考温度中设定。

标准状态熵

对于可逆反应如果你使用有限速度模型（参阅 Arrhenius 速度一节），你需要为每一组分 j^'定义标准状态熵。这些输入用于定义混合熵：

$$S = \sum_{j'} m_{j'} \left[s_{j'}^0 + \int_{T_{ref,j'}}^{T} \frac{c_{p,j'}}{T} dT \right]$$

其中 T_ref,j^'是定义 s_j^'^0 时的参考温度。标准状态熵的国际标准单位是 J/kgmol-K，英制

单位是 BTU/lbmol-R。

对于和反应相关的每一组分（即，每一个流体材料都包含在混合材料中），你可以在材料面板一节中的 1 的标准状态熵和参考温度中设定。

分子热传导系数

如果你模拟预混和燃烧（见模拟预混和燃烧一节），那么流体区域的流体材料应该分配为未燃烧混合物的属性，包括分子热传导系数（湍流燃烧速度一节中方程 1 的 c），也是指定义为 k/r c_p 的热扩散系数 c，在标准状态下其数值可以查阅燃烧手册（如：[86]）。要确定非标准条件下的数值，你需要使用第三方具有详细化学说明的 1D 燃烧程序。你可以在使用材料面板一节中的 1 的分子热传导系数中设定它们。

分子运动论参数

当使用理想气体定律时，你可以选择使用分子运动论定义下面的属性：

- 粘性（流体）
- 热传导系数（流体）
- 指定热容（流体）
- 质量扩散系数（对于多成分混合物）

如果你使用分子运动论计算流体粘性（使用分子运动论定义粘性中的方程 1），你需要输入分子运动论参数以及该流体的 e/k。这些参数是 Lennard-Jones 参数，在 FLUENT 被分别称为“特征长度”和“能量参数”。

当分子运动论只用于计算流体的热传导系数时，不需要输入任何内容。

如果你打算使用分子运动论计算流体指定的热容(使用分子运动论定义组分热容中的方程 1)，你需要输入流体材料的自由度。

如果你使用分子运动论定义混合材料的质量扩散系数时(多成分方法中的输入一节中的方程 3)，你就需要输入每一化学组分的 s_i 和(e/k)_i。

分子运动论中需要的输入

使用分子运动论的程序如下：

1. 对于粘性、热传导系数或者流体材料的热容 Cp 以及混合材料的质量扩散系数选择分子运动论作为适当的指定方法。
2. 如果你选择使用分子运动论方法所指定的一种或多种属性是流体材料所具有的，你必须为这个材料设定分子运动论参数。如果你使用分子运动论设定混合材料的扩散系数，你需要为每一个组成成分（流体材料）定义分子运动论参数。

需要设定的参数如下：

- L-J 特征长度
- L-J 能量参数
- 自由度（仅用于使用分子运动论指定热容的情况）。

请参阅分子运动论一节来决定使用分子运动论计算每一属性所需要的参数。

特征长度的单位是埃（Angstroms），能量参数定义的单位是以绝对温度的单位为基准，自由度是无量纲数。在默认情况下，所有的分子运动论参数都设为零。不同材料的适当值可

以查阅相关文献（如[65]）。

操作压力

对于不同的流动状态，操作压力的指定以不同的方式影响你的计算。本节介绍了操作压力的相关信息，对不同情况的相关性，如何正确的设定它。

在低马赫数流动中压力计算的数值截断的影响

在低马赫数可压流动中，全部的压降和绝对静压相比很小，因此数值截断会对其有很大的影响。比方说吧，考虑 M << 1 的可压流动。压力变化 D p 与动压头(1/2) c p M^2 有关，其中 p 是静压，c 是指定的比热比。这就给出了 D p/p 和 M^2 的关系式，以至于 M——〉0 时 D p/p——〉0。因此，除非给予足够的注意，否则低马赫数流动计算结果往往很容易会受到截断误差截断误差的影响。

操作压力、标准压力和绝对压力

FLUENT 通过从绝对压力中减去操作压力（一般说来大的压力粗略的等于流动中绝对压力的平均值）来避免截断误差（见在低马赫数流动中压力计算的数值截断的影响一节）产生的问题，并使用得到的压力来计算，这个压力称作标准压力。下面是操作压力，标准压力和绝对压力之间的关系式。绝对压力是操作压力和标准压力之和：

$$p_{abs} = p_{op} + p_{gauge}$$

你所指定的所有压力以及 FLUENT 所报告和计算的压力都是标准压力。

设定操作压力

操作压力的意义

操作压力对于不可压理想气体流动来说是十分重要的，因为它直接决定了不可压理想气体定律所计算出来的密度，不可压理想气体定律计算密度的关系式为：r = (p_op/R T)。因此，你必须保证适当的设定操作压力。

操作压力在低马赫数可压流动中具有十分重要的意义，因为它在避免截断误差问题中扮演了重要的角色，如操作压力，标准压力和绝对压力一节所述。同样地，你必须保证适当地设定操作压力。

对于高马赫数可压流动，操作压力的意义就不是很明显了。在这种情况下，压力的变化比低马赫数可压流动中压力的变化大得多，因此截断误差不会产生什么实际的问题，因此也就不真正需要使用标准压力。事实上，在这种计算中使用绝对压力通常会更方便。因为 FLUENT 总是使用标准压力，所以你可以简单的设定操作压力为零，而使标准压力和绝对压力相等。

如果密度假定为常数，或者密度是从温度的轮廓函数中推导出来，那么根本就不使用操作压力。需要注意的是：默认的操作压力为 101325 Pa.。

如何设定操作压力

选择合适的操作压力的判据是基于流动马赫数的区域以及确定密度的关系式。例如：如果你在不可压流动的计算中使用理想气体定律（如自然对流问题），你应该使用平均流动压力的典型值。

下表是设定操作压力的推荐方法。请记住默认的操作压力为 101325 Pa。

Density Relationship	Mach Number Regime	Operating Pressure
Ideal Gas Law	$M > 0.1$	0 or $\approx$ Mean Flow Pressure
	$M < 0.1$	$\approx$ Mean Flow Pressure
Profile Function of Temperature	Incompressible	not used
Constant	Incompressible	not used
Incompressible Ideal Gas Law	Incompressible	$\approx$ Mean Flow Pressure

Figure 1: 操作压力的推荐设定

你需要在操作压力面板中设定操作压力。菜单：Define/Operating Conditions...。

参考压力位置

对于不包括任何压力边界的不可压流动，FLUENT 会在每次迭代之后调节标准压力场以避免它浮动。这一操作是通过在（或接近）参考压力位置的单元中使用的压力实现的。在完全的压力场中减去单元内的压力值，从而保证参考压力位置的标准压力总为零。如果包含了压力条件，就不需要调节了，参考压力位置也忽略了。

参考压力位置默认为单元的中心或者接近点(0，0，0)。有时候你可能想要移动参考压力位置，也许要将它定位于绝对压力已知的点处（比如：如果你想将计算结果和实验数据比较）。要改变位置，请在操作压力面板中输入参考压力位置的新的坐标值（X，Y，Z）。菜单：Define/Operating Conditions...。

基本物理模型

本章介绍了 FLUENT 所提供的基本物理模型以及相关的定义和使用。

基本物理模型概述

FLUENT 提供了从不可压到可压、层流、湍流等很大范围模拟能力。在 FLUENT 中,输运现象的数学模型与所模拟的几何图形的复杂情况是结合在一起的。FLUENT 应用的例子包括层流非牛顿流的模拟，涡轮机和汽车引擎的湍流热传导，锅炉内煤炭粉碎机的燃烧，可压射流，空气动力外流，以及固体火箭发动机的可压化学反应流。

为了与工业应用相结合，FLUENT 提供了很多有用的功能。如多孔介质，块参数（风扇和热交换），周期性流动和热传导，涡流，以及移动坐标系模型。移动参考系模型可以模拟单一或者多个参考系。FLUENT 还提供了时间精度滑动网格方法以及计算时间平均流动流场的混合平面模型，滑动网格方法在模拟涡轮机多重过程中很有用。FLUENT 中另一个很有用的模型是离散相模型，这个模型何以用于分析喷雾和粒子流。，多项流模型可以用于预测射流的破散以及大坝塌陷之后流体的运动，气穴现象，沉淀和分离。

湍流模型是 FLUENT 中很重要的一部分，湍流会影响到其它的物理现象如浮力和可压缩性。湍流模型提供了很大的应用范围，而不需要对特定的应用做出适当的调节，而且它涵括了其它物理现象的影响，如浮力和可压缩性。通过使用扩展壁面函数和区域模型，它可以对近壁面的精度问题有很好的考虑。

各种热传导模式可以被模拟，其中包括具有或不具有其它复杂性如变化热传导的，多孔介质的自然的、受迫的以及混合的对流。模拟相应介质的辐射模型及子模型的设定通常可以将燃烧的复杂性考虑进来。FLUENT 一个最强大的功能就是它可以通过耗散模型或者和概率密度函数模型来模拟燃烧现象。对于燃烧应用十分有用的其它模型也可以在 FLUENT 中使用，其中包括碳和液滴的燃烧以及污染形成模型。

连续性和动量方程

对于所有的流动，FLUENT 都是解质量和动量守恒方程。对于包括热传导或可压性的流动，需要解能量守恒的附加方程。对于包括组分混合和反应的流动，需要解组分守恒方程或者使用 PDF 模型来解混合分数的守恒方程以及其方差。当流动是湍流时，还要解附加的输运方程。

本节所介绍的是层流流动的守恒方程（在惯性（无加速度）的坐标系中）。后面几节将会讨论热传导、湍流模拟以及组分输运的守恒方程。关于旋转坐标系中的方程将在移动区域的流动中介绍。

欧拉方程用于解决无粘流动，将在无粘流动一节中介绍

质量守恒方程

质量守恒方程又称连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\right)=S_m$$

该方程是质量守恒方程的一般形式，它适用于可压流动和不可压流动。源项 S_m 是从分散的二级相中加入到连续相的质量（比方说由于液滴的蒸发），源项也可以是任何的自定

义源项。

二维轴对称问题的连续性方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v)\frac{\rho v}{r}=S_m$$

具体各个变量的意义可以参阅相关的流体力学书籍，其中有具体而详细地介绍。

动量守恒方程

在惯性（非加速）坐标系中 i 方向上的动量守恒方程为[8]：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i$$

其中 p 是静压，t_ij 是下面将会介绍的应力张量，r g_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力（如离散相相互作用产生的升力）。F_i 包含了其它的模型相关源项，如多孔介质和自定义源项。

应力张量由下式给出：

$$\tau_{ij}=\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}$$

上式的物理意义可以参阅流体力学教科书，其中会讲得很清楚。

对于二维轴对称几何外形，轴向和径向的动量守恒方程分别为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho uu)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho vu)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(2\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{2}{3}(\nabla\cdot\vec{v})\right)\right]$$

$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+F_x$$

以及

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho uv)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho vv)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial r}\right)\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{2}{3}(\nabla\cdot\vec{v})\right)\right]$$

$$-2\mu\frac{v}{r^2}+\frac{2}{3}\frac{\mu}{r}(\nabla\cdot\vec{v})+\rho\frac{w^2}{r}+F_r$$

其中：

$$\nabla\cdot\vec{v}=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{v}{r}$$

w 是漩涡速度（具体可以参阅模拟轴对称涡流中漩涡和旋转流动的信息）

热传导

FLUENT 允许在你模型的流体和/或固体区域包含热传导。本节中所介绍的物理模型和相关输入可以处理从流体内热混合到复合固体的热传导等问题。自然对流问题会在浮力驱动流动一节介绍，自然对流与辐射模型将在辐射模拟一节介绍

FLUENT 可以预测周期性几何外形的热传导，如密集的热交换器，它只需要考虑单个

的周期性模块进行分析。关于这样流动的处理，需要使用周期性边界条件，具体可以参阅周期性流动和热传导一节。

在两个分离的流动区域解决热传导问题

如果所模拟的流动包括了两个流体区域，其中被固体区域或者壁面分离开，如下图所示，你需要更细心的定义问题。主要需要指定：

- 两个流体区域都不可以使用质量出口边界条件
- 每一个流体区域可以选择不同的流体材料。（然而对于组分计算，你只能在整个区域选择唯一一种混合材料）

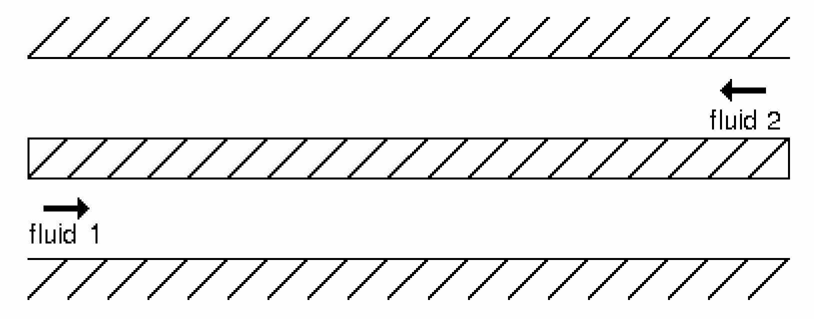


Figure 1:典型的逆流热交换，在两个流体区域包括了热传导

理论

能量方程

FLUENT 所解的能量方程的形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_i(\rho E+p)\right)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i}-\sum_{j'}h_{j'}J_{j'}+u_j\left(\tau_{ij}\right)_{eff}\right)+S_h$$

其中 k_eff 是有效热传导系数（k + k_t,其中 k_t 是湍流热传导系数，根据所使用的湍流模型来定义），J_j^'是组分 j^'的扩散流量。上面方程右手边的前三项分别描述了热传导、组分扩散和粘性耗散带来的能量输运。S_h 包括了化学反应热以及其它用户定义的体积热源项。

在上面的方程中：

$$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{u_i^2}{2}$$

其中，理想气体的显焓定义为：

$$h=\sum_{j'}m_{j'}h_{j'}$$

对于可压流为：

$$h=\sum_{j'}m_{j'}h_{j'}+\frac{p}{\rho}$$

在方程 5 和 7 中，m_j^'是组分 j^'的质量分数，而且

$$h_{j'} = \int_{T_{ref}}^{T} c_{p,j'} dT$$

其中 T_ref 为 298.15 K.

PDF 模型的能量方程

当激活非绝热 PDF 燃烧模型时，FLUENT 解总焓形式的能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{k_i}{c_p}\frac{\partial H}{\partial x_i}\right)+\tau_{ik}\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+S_h$$

假定 Lewis 数为 1，右手边第一项表示传导和组分扩散项。非守恒形式的粘性扩散项的贡献由第二项描述。总焓 H 定义为：

$$H = \sum_{j'} m_{j'} H_{j'}$$

其中 m_j^'为组分 j^'的质量分数，而且

$$H_{j'} = \int_{T_{ref,j'}}^{T} c_{p,j'} dT + h_{j'}^{0}\left(T_{ref,j'}\right)$$

$h_{j'}^{0}\left(T_{ref,j'}\right)$ 是在参考温度 T_ref,j^'下组分 j^' 的生成焓

包括压力作用和动能项

能量方程中的方程 1 包含了不可压流动中常常忽略的压力作用和动能项。因此，在默认的情况下，分离解算器在解不可压流动时不考虑压力作用和动能项。如果你希望考虑这些作用，可以使用 define/models/energy?文本命令将所需的项激活。

模拟可压流或者使用耦合解算器时，压力作用和动能项总是压考虑的。

包括粘性耗散项

能量方程中的方程 1 和 PDF 模型的能量方程中的方程 1 包括了粘性耗散项，该项所描述的是粘性剪切所产生的热能。使用分离解算器时，FLUENT 默认的能量方程不包括它（因为粘性热可以忽略）。当 Brinkman 数 Br 接近或者大于一，粘性热将会很重要。其中：

$$Br = \frac{\mu U_e^2}{k \Delta T}$$

D T 为系统温度的差分。

你需要考虑粘性耗散项并且使用分离解算器，你需要在粘性模型面板激活粘性热项。对于可压流动一般有 Br ≥1。但是需要注意的是，当使用分离解算器时，如果你定义了可压流动模型，FLUENT 并不自动激活粘性耗散项。

当使用耦合解算器时，所解的能量方程总会包含粘性耗散项。

包括组分扩散项

能量方程一节中的方程 1 和 PDF 模型的能量方程一节中的方程 1 包括了由于组分扩散而导致的焓的输运的影响。当使用分离解算器时，在默认情况下，$\frac{\partial}{\partial x_i}\sum_{j'} h_{j'} J_{j'}$ 会包含在能量方程一节的方程 1 中。如果你不想包括它，你可以在组分模型面板中关闭扩散能量源项的选项。

当使用非绝热 PDF 燃烧模型时，该项并不是显式的出现在能量方程中，因为对于 PDF 模型的能量方程一节中的方程 1 来说，该方程右手边的第一项已经包含了它。

当使用耦合解算器时，该项总是包含在能量方程中。

由于化学反应产生的能量源项

能量方程一节中的方程 1 的能量源项 S_h 包括了由于化学反应而产生的能量源项：

$$S_{h,reaction} = \sum_{j'} \left[\frac{h_{j'}^0}{M_{j'}} + \int_{T_{ref},j'}^{T_{ref}} c_{p,j'} dT \right] R_{j'}$$

其中 h^o_j^'是组分 j^'的生成焓，R_j^'是组分 j^'的体积生成速度。

非绝热 PDF 燃烧模型的能量方程中，焓的定义已经包括了能量的生成（见 PDF 模型的能量方程一节中的方程 5，所以能量的反应源项不包括在 S_h 中。.

由于辐射产生的能量源项

当使用某一辐射模型时，能量方程一节中的方程 1 和 PDF 模型的能量方程一节中的方程 1 的 S_h 也包括了辐射源项。详情参阅辐射模型一节。

相间的能量源项

需要注意的是，能量源项 S_h 还包括连续和离散相之间的热传导。在后面的离散与连续相耦合一节将会详细讨论。

壁面处热传导的边界条件

壁面处热传导边界条件在标准壁面函数一节中讨论。

固体区域的能量方程

FLUENT 所用的固体区域的能量输运方程的形式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + \dot{q}'''$$

其中 r　=密度

h　=　显焓（integral_T_ref^T c_p dT）

k　=　传导系数

T　=　温度

q(dot)^'''　=　体积热源

方程 1 左手边的第二项体现了由于固体的平移和旋转而导致的能量对流热传导。速度场 u_i 由指定固体区域的运动计算出来（见固体条件一节）。方程 1 右手边的项分别是固体内部热传导流量和体积热源的热流量。

固体的各向异性热传导

当使用分离解算器时，FLUENT 允许你制定固体材料的各向异性热传导系数。固体的各向异性传导项形式为：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{ij}\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)$$

其中 k_ij 是热传导系数矩阵。关于固体材料的各向异性热传导系数的制定可以参阅固体的各向异性热传导系数一节。

入口处的扩散

入口处能量的净输入既包括对流部分也包括扩散部分。对流部分由你所指定的入口温度确定。扩散部分依赖于计算出温度场的梯度。因此扩散部分（相应的净入口输运）不是提前指定的。

在某些情况下，你可能希望指定入口处的能量净输运而不是入口温度。如果你使用分离解算器，你可以通过取消入口能量扩散来实现这一目标。在默认的情况下，FLUENT 在入口处会考虑能量的扩散流量。要关闭入口扩散，可以使用文本命令：define/models/energy?。

如果你使用耦合解算器，入口扩散选项无法关闭。

热传导所需的用户输入

当 FLUENT 模型包含了热传导，你需要激活相关的模型，提供热边界条件，并输入控制热传导和/或随温度变化的材料属性。本节将会介绍这些输入。

下面将会介绍热传导问题的设定步骤。（注意：本步骤只包括热传导模型设定的必须步骤，你还要设定其它的模型，边界条件等。）

1. 要激活热传导的计算，请在能量面板中打开激活能量方程选项。菜单：Define/Models ?Energy...。

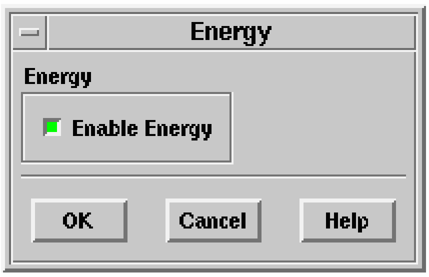


Figure 1: 能量面板

2. (可选，只用于分离解算器)如果你模拟粘性流动，而且希望在能量方程中包括粘性热传导项，请在粘性模型面板中打开粘性热传导项。如包含粘性耗散一节中所述，当使用分离解算器时，FLUENT 在默认的情况下会忽略能量方程中的粘性热传导项（如果使用耦合解散器，则会一直包含粘性热传导项。当流体中的剪切应力较大（如：润滑问题）和/或速度较高、可压流动，就应该激活粘性耗散项（见包含粘性耗散项一节中的方程 1）。菜单 Define/Models/Viscous...
3. 在流动入口、出口和壁面处定义热边界条件。菜单：Define/Boundary Conditions...。
   在流动的出入口你需要设定温度，在壁面处你可能需要设定下面的某一热条件：

- 指定热流量
- 指定温度
- 对流热传导
- 外部辐射
- 外部辐射和外部对流热传导的结合

定义壁面处热边界条件一节详细地介绍了控制热边界条件的模型输入。入口处默认的热边界条件为指定的温度 300 K；壁面处默认的条件为零热流量（绝热）。关于边界条件的输入请参阅边界条件一章。

4. 定义适合于热传导的材料属性。菜单：Define/Materials...
   如物理属性一节所述，必须定义热容和热传导系数，而且你可以指定很多属性为温度的函数。

温度的上下限

出于稳定性考虑，FLUENT 包括了预测温度范围的限制。设定温度上下限的目的是为了提高计算的稳定性，从物理意义上说，温度应该处于已知极限的范围之内。有时候方程中间解会导致温度超出这些极限，此时就无法很好的定义属性。温度极限保证你的问题的温度在期待的范围之内。如果计算的温度超出最大极限，那么所存储的温度就会固定在最大值处。默认的温度上限是 5000 K。如果计算的温度低于最小极限，那么存储的温度就会固定在最小值处。默认的温度下限是 1 K。

如果你所预期的温度超过 5000 K，你应该使用解限制面板来增加最大温度。菜单：Solve/Controls/Limits...。

热传导的解过程

虽然使用 Fluent 默认的解参数可以成功的解决很多简单的热传导问题，你还是可以使用本节所提供的指导方针来加速收敛速度和解的稳定性。

能量方程的亚松驰

使用分离解算器时，FLUENT 可以使用你在解控制面板所定义的亚松驰参数来处理亚松驰能量方程，具体可以参阅设定松弛因子一节所介绍的内容。菜单：Solve/Controls/Solution...。

如果使用非绝热 PDF 模型，你需要像通常一样设定能量亚松弛因子，但是你也可以设定温度的亚松弛因子，其用法和解焓方程时温度的亚松驰一节所介绍的一样。

FLUENT 不会管所解能量方程是温度还是焓形式，它都会设定默认的亚松弛因子为 1.0。在能量场影响流体流动（通过温度相关属性或者焓）的问题中，你应该是用较小的亚松弛因子，一般在 0.8 到 1.0 之间。当流场和温度场解耦时（没有温度相关属性或者浮力），你可以保留松弛因子的默认值 1.0。

解焓方程时温度的亚松弛

当解焓形式的能量方程时（即当你使用非绝热 PDF 燃烧模型时），FLUENT 也对温度进行亚松弛，也就是说，只是用焓（亚松弛）变化对应的温度变化的某一分数来更新温度场。当你希望焓场变化较快时，二层的亚松弛很有用，只是温度响应比较之后，相应的温度对流场的影响也会滞后。FLUENT 对于温度的亚松弛默认设定为 1.0，此设定使用解控制面板来实现。

屏蔽组分扩散项

如果使用分离解算器来解决组分输运，而且遇到了收敛困难，你应该考虑在组分模型面板中关闭扩散能量源项。菜单：Define/Models/Species...。

当改选项关闭时，FLUENT 会忽略能量方程的组分扩散影响。注意：当使用耦合解算器时组分扩散影响总会被考虑到的。

步进解

最为有效的预测热传导策略是先计算等温流动然后加入能量方程的计算。步骤稍有不同，主要取决于流动和热传导是否耦合。

如果流动和热传导是解耦的（没有温度相关属性或浮力），你可以首先解等温流动（关闭能量方程）来产生收敛的流场解，然后单独解能量输运方程。

注意：因为耦合解算器总是一起解流动和能量方程，所以单独解能量方程只应用于分离解算器。

你可以在解控制面板中的方程列表中取消能量选项来临时关闭流动方程或者能量方程（请参阅步进解一节）。菜单：Solve/Controls/Solution...。

如果流动和热传导是耦合的（也就是模型中包括温度相关属性或浮力），你可以在打开能量方程之前首先解流动方程。一旦你有了收敛的流场解，你就可以打开能量选项然后同时解流动和能量方程完成热传导的模拟。

热传导的报告

FLUENT 为热传导模拟提供了附加的报告选项。你可以生成图形或者报告下面的变量或函数：

- 静温
- 总温
- 焓
- 相对总温
- 壁面温度（内部表面）
- 壁面温度（外部表面）

- 总焓
- 总焓误差
- 熵
- 总能量
- 内能
- 表面热流量
- 表面热传导系数
- 表面努塞尔（Nusselt）数
- 表面斯坦顿（Stanton）数

上面所示的前 11 个变量包含在后处理面板中的变量选择下拉列表的温度类别中，剩下的变量在壁面流量类别中。关于它们的定义可以参阅流场函数定义一节。

在报告和显示中焓与能量的定义

焓与能量报告值的定义是不同的，它取决于流动可压与否。完全的定义请参阅流场变量及其定义的列表。

报告通过边界的热传导

你可以使用流量报告面板来计算通过每一个边界的热传导或者将通过所有边界的热流量加起来来检查热平衡。菜单：Report/Fluxes...。

推荐检查热平衡以确认你的解是收敛的。关于流量报告的生成请参阅通过边界的流量一节。

报告通过表面的热传导

你可以使用曲面积分面板（在曲面积分一节介绍）来计算通过任何边界的热传导或者计算通过曲面的热传导，这个曲面可以在显示和报告曲面数据一节中介绍的方法来创建。菜单：Report/Surface Integrals...。

要报告焓的流速

$$Q = \int \rho H \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

在曲面积分面板选择流动速度选项，选择焓（在温度类别中）作为流场变量，然后选择需要积分的一个或多个曲面。

报告平均热传导系数

曲面积分面板还可以报告在曲面上的平均热传导系数 h，菜单：Report/Surface Integrals...。

在曲面积分面板中选择平均选项，选择曲面热传导系数（在壁面流量类别中）作为流场变量然后点击相应的曲面。

浮力驱动流动和自然对流

当加热流体，而且流体密度随温度变化是，流体会由于重力原因的而导致密度的变化。这种流动现象被称为自然对流（或者混合对流），Fluent 可以模拟这种流动。

理论

可以用 Grashof 数 Reynolds 雷诺数的比值来度量浮力在混合对流中的作用：

$$\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2} = \frac{\Delta \rho gh}{\rho v^2}$$

当这个数接近或者超过一，你应该考虑浮力对于流动的贡献。反之，你就可以忽略浮力的影响。在纯粹的自然对流中，浮力诱导流动由瑞利数（Rayleigh）度量：

$$Ra = g\beta \Delta TL^3 \rho / \mu\alpha$$

其中热膨胀系数为：

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial T}$$

热扩散系数为：

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

Rayleigh 数小于 10^8 表明浮力诱导为层流流动，当瑞利数在 10^8 到 10^10 之间就开始过渡到湍流了。

Boussinesq 模型

对于很多自然对流流动，你可以用 Boussinesq 模型来得到更好的收敛速度，它要比设定密度为温度的函数来解决问题收敛得快。除了动量方程的浮力项之外，该模型在所有解决的方程中将密度看成常数。动量方程为：

$$(\rho - \rho_0)g \cong -\rho_0\beta(T - T_0)g$$

其中 r_0 是流动的常数密度，T_0 是操作温度，b 是热扩散系数。上面的方程是通过 Boussinesq 近似等于 r_0 (1 - b D T)来消除浮力项中的 r 得到的。只要真实密度变化很小，该近似是很精确的.

使用 Boussinesq 模型的时机

在封闭区域使用 Boussinesq 模型来计算时间相关自然对流是很必要的。假如温度变化很小，该模型也可以用于定常问题。

Boussinesq 模型不能用于组分，燃烧和反应流动的计算。

浮力驱动流动的用户输入

在混合或自然对流中，你必须提供下面的输入来考虑浮力问题：

1. 在能量面板中打开能量方程选项。菜单：Define/Models/Energy...。
2. 在操作条件面板（下图）中打开重力选项，并在每一个方向上输入相应的重力加速度数值。菜单：Define/Operating Conditions

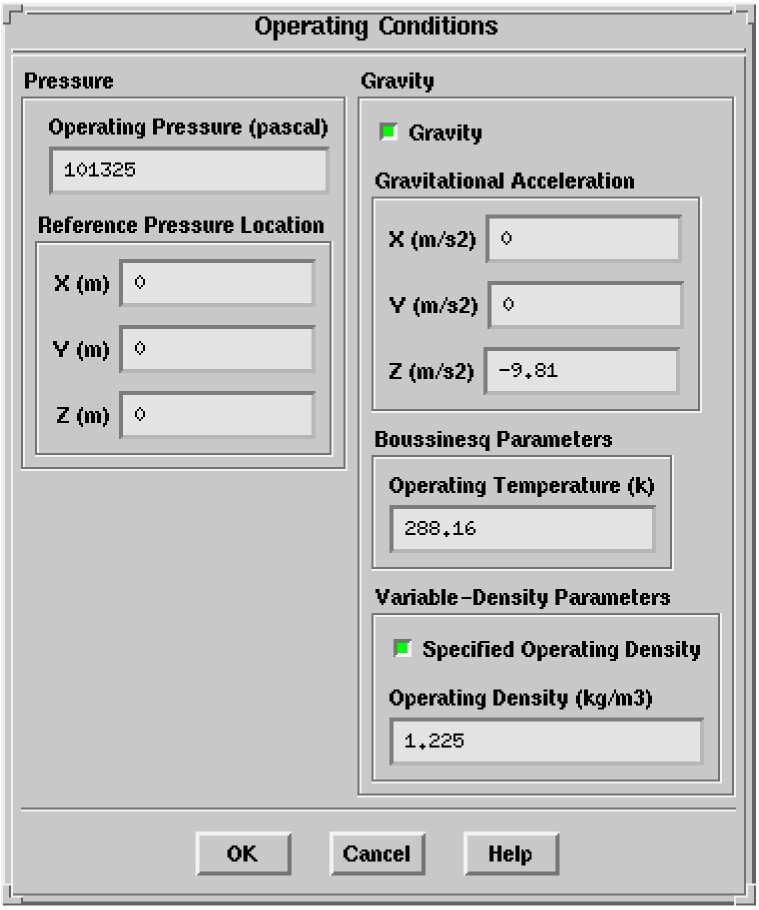


Figure 1: 操作条件面板

注意，FLUENT 中默认的重力加速度为零

3. 如果使用不可压理想气体定律，要在操作条件面板中检查操作压力的数值（非零值）。
4. 下面的选项取决于你是否使用 Boussinesq 近似：

- 如果不使用 Boussinesq 模型，输入如下：
    1. 必要的话在操作条件面板中激活操作密度选项，然后指定操作密度，详细设置可以参阅定义操作密度一节。
    2. 定义流体密度为温度的函数，具体可以参阅使用温度相关函数和密度定义属性一节。菜单：Define/Materials...。
- 如果使用 Boussinesq 模型，输入如下：
    1. 在操作条件面板中指定操作温度（Boussinesq 模型一节中方程 1 的 T_0）
    2. 选择 Boussines 方法来计算在使用材料面板中的密度（具体可以参阅使用温度相关函数和密度定义属性一节）。
    3. 还是在材料面板中，设定热扩散系数并指定常数密度。

注意：如果模型包括多种材料，对于每一个材料你都可以选择是否使用 Boussinesq 模型。因此你可以对某些材料使用 Boussinesq 模型其它的可以不使用。关于每一个材料的设

定步骤都和上面所介绍的一样。

5. 在压力入口和出口边界处的你所输入的边界压力是重新定义的压力，该压力由操作密度的定义一节中的方程 3 给出。一般说来，如果没有外部强加的压力梯度，FLUENT 模型在入口和出口边界处的压力 p^'应该是相等的。菜单：Define/Boundary Conditions...。
6. 在解控制面板中，选择加权的体积力或者二阶方法作为压力的离散方法。菜单：Solve/Controls/Solution...。

你需要在近壁面增加单元以解决边界层问题。

如果你使用四边形或六面体网格并使用分离解算器，推荐选择 PRESTO!作为压力的离散方法。也可以参阅热传导计算设定所需的用户输入。

操作密度的定义

当不使用 Boussinesq 近似时，操作密度 r_0 在动量方程中出现在体积力一项中：

$$(\rho - \rho_0)g$$

该种形式的体积力项遵从 FLUEＮT 中压力的重定义：

$$p_s' = \rho_0 g x + p_s$$

这样，静止流体可以保证静压平衡

$$\frac{\partial p_s}{\partial x} = \rho g$$

变成：

$$\frac{\partial p_s'}{\partial x} = (\rho - \rho_0)g$$

因此，在所有的浮力驱动流动中，参考密度的定义都是很重要的。

在默认的情况下，FLUENT 会通过对所有单元取平均来计算操作密度。在某些算例中如果你明确指定操作密度而不是让解算器来计算密度，你可能会得到更好的结果。比方说，如果你用压力边界条件解自然对流问题，知道你所指定的压力是方程 3 中的 p_s^'是很重要的。。即使你知道真实压力 p_s，你还是需要知道操作密度 r_0，以便于从 p_s 确定 p_s^'。因此，你应该明确定义操作密度而不使用计算的平均值。但无论如何你所指定的密度都应该是对平均值的描述。

在某些情况下，指定操作密度会提高解的收敛性而不会改善实际的结果。对于这种情况，使用近似 bulk 密度值作为操作密度，并保证你所选的值对于区域的特征温度是合适的。

注意：如果你使用 Boussinesq 近似，就不会使用操作密度了，所以你也不必指定它。

浮力驱动流动的解策略

对于高瑞利数流动，你需要考虑下面的解决方针。除此之外，在解决其它热传导问题的处理过程中所介绍的指导原则也可以用于浮力驱动流动。但是，需要注意的是对于高瑞利数的某些层流流动是没有定常解存在的。

解决高瑞利（Rayleigh）数流动的方针

对于高瑞利数流动(Ra > 10^8)，为了得到最好的结果你应该遵循下面所介绍的某一处理程序：

第一个程序使用定常状态方法：

1. 开始解决时使用较低的瑞利数（如：10^7），然后使用一阶格式运行直到收敛。
2. 改变有效瑞利数，改变重力加速度的数值（如：从９．８改为０．０９８来使瑞利数减少两个量级）.
3. 使用上面的结果作为高瑞利数流动的初始猜测，然后用一阶格式开始高瑞利数流动的计算。
4. 用一阶格式获得解之后，你可以采用高阶格式继续计算。

第二个程序使用时间相关方法来获取定常解[62]：

1. 使用相同或较低瑞利数时得到的定常状态解开始计算。
2. 估计时间常数为[14]：

   $$\tau = \frac{L}{U} \sim \frac{L^2}{\alpha}\left(\Pr Ra\right)^{-1/2} = \frac{L}{\sqrt{g\beta\Delta TL}}$$

   其中 L 和 U 分别是长度和速度。使用时间步长 D t：

   $$\Delta t = \frac{\tau}{4}$$

   如果使用更大的时间步长 D t 可能会导致发散。mp
3. 当频率 f t = 0.05--0.09 的振动衰减之后，就达到了定常状态。注意，t 是方程１中估计的时间常数，ｆ是单位为Ｈｚ的振动频率。一般说来，要达到定常状态一般要进行５０００个时间步。

注意：除非使用 Boussinesq 近似，否则非定常方法不能用于封闭区域。它总是用于具有入口和出口的区域。

浮力驱动流动的后处理

浮力驱动流动的后处理报告和其它热传导计算的报告一样。详情请参阅热传导的报告一节

周期性流动和热传导

周期流是指流动和热的解具有周期性重复的特点。周期性流动分两种：一种是在周期性平面内没有压降的周期流；第二种是流向周期流。本解讨论流向周期流以及周期性热传导，关于没有压降的周期流请参阅周期性边界条件一节。

引言

FLUENT 提供流向周期流的计算。这种流动具有广泛的应用，如热交换管道以及通过水箱的管流。在这些流动模式中，几何外形沿流动方向上具有重复性的特点，从而导致了周期性完全发展的流动。这些周期性条件在足够的入口长度后就会形成，具体与雷诺数和几何

外形有关。

流向周期流会在足够长度 L 之后形成，在流向的每一个重复流动模式之间会有一个一定的压降。下图就是一例。

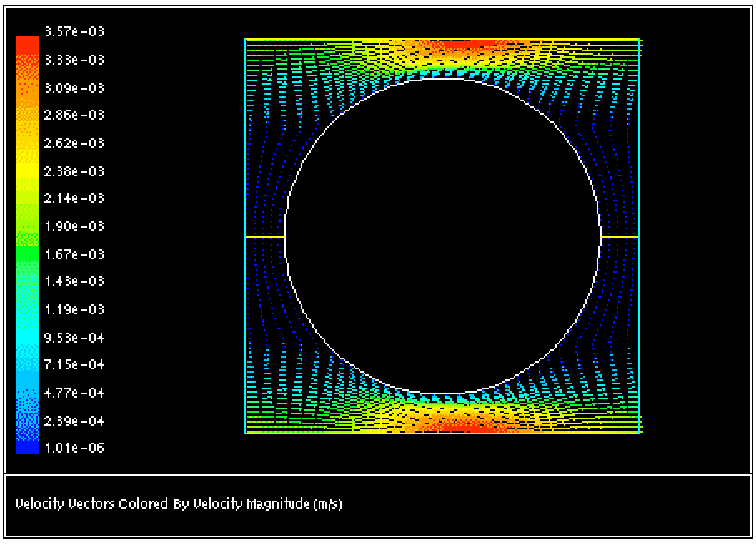


Figure 1: 二维热交换几何外形的周期性流动例子

- 交换的几何外形
- 当壁面是常温或者热流一定时会产生周期性热条件。在这一问题中，温度场是周期性发展的。至于周期性流动，分析这类问题可以将数值模型限制为单一模块或者周期性章度。使用流向周期性流动和热传导的限制 ：
- 流动必须不可压
- 几何外形必须是平移性的周期
- 用耦合解你只能指定压力跳跃，分离解可以指定压力跳跃或者流速。
- 在流动入口和出口没有质量的增加，外部源项或者离散相源
- 只能模拟出入口所包括的组分（没有质量的净增加），不允许有反应流
- 不允许离散相和多项流模型

周期性热传导的特殊限制：

- 必须使用分离解
- 热边界条件必须指定热流或者壁面温度常数。而且在特定的问题上这些边界类型不能结合在一起：对于常温算例，所有壁面温度必须是相同的，在壁面流量中，不同的热流必须区分为不同的壁面。
- 在有固体的区域不可以横跨周期性平面
- 热动力学和流体的输运性质（比热容，热传导系数，粘性系数，密度）不能是温度的函数，因此不可以模拟化学反应流。然而输运性质可能会以周期性的方式变化，这就允许你模拟周期性湍流，在这种周期性湍流流动中，输运性质（有效热传导系数，有效粘性系数）随着湍流流场变化。

周期流模拟程序概述

考虑流向周期性流动和热传导的典型计算分两个部分。第一是不考虑温度场的速度场计算，然后固定速度场来计算温度场。步骤如下：

2. 设定流向周期性边界条件网格

3. 输入热力学常数和输运常数
4. 通过周期性边界条件指定周期性压力梯度以及净质量流速
5. 计算周期性流场，计算动量方程、连续性方程以及湍流方程（可选）
6. 指定壁面热边界条件：温度或热流
7. 定义入口温度
8. 解能量方程预测周期性温度场

下面详细介绍

流向周期性流动

理论

对于位置矢量，周期性假定有如下形式

$$u(\vec{r}) = u(\vec{r} + \vec{L}) = u(\vec{r} + 2\vec{L}) = \cdots$$

$$v(\vec{r}) = v(\vec{r} + \vec{L}) = v(\vec{r} + 2\vec{L}) = \cdots$$

$$w(\vec{r}) = w(\vec{r} + \vec{L}) = w(\vec{r} + 2\vec{L}) = \cdots$$

其中 L 是所考虑区域的周期长度矢量

在方程 1 中压力不是周期性的。取而代之的是，模块之间的压降是周期性的：

$$\Delta p = p(\vec{r}) - p(\vec{r} + \vec{L}) = p(\vec{r} + \vec{L}) - p(\vec{r} + 2\vec{L}) = \cdots$$

如果使用某一耦合解算器，D p 被指定为常值。对于分离解算器，区域内每一位置的压力梯度可以分解为两个部分：周期性部分的梯度?p (r)，以及线性变化部分的梯度 b (L/|L|)：

$$\nabla p(\vec{r}) = \beta \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|} + \nabla \tilde{p}(\vec{r})$$

周期性压力(p (r))减去线性变化的压力而得到的压力。压力的线性变化部分(b |r|)在动量方程中对流体有一作用力。因为 b 的值无法提前预知，所以必须迭代直到达到在计算模型中你所定义的质量流速为止。B 的修正是在 SIMPLE, SIMPLEC, 或 PISO 算法的修正步中实现的，其修正是基于所需质量流和实际质量流之间的差值的。你可以控制子迭代的次数来更新 b，具体可以参阅使用分离解算器计算流向周期性流动所需用户输入一节。

使用分离解算器计算流向周期性流动的用户输入

如果使用分离解算器，为了计算出具有指定质量流速和压力导数的空间周期性流动，你必须创建具有平移性周期边界的网格，该网格中的单元相互平行且尺寸相等。你可以在周期性面板中指定平移性周期，具体可以参阅周期性边界条件一节。（如果想要创建周期性边界请参阅创建周期性区域一节）。

读入网格之后，你需要在周期性条件面板(Figure 1)中完成下面的输入。菜单：Define/Periodic Conditions...。

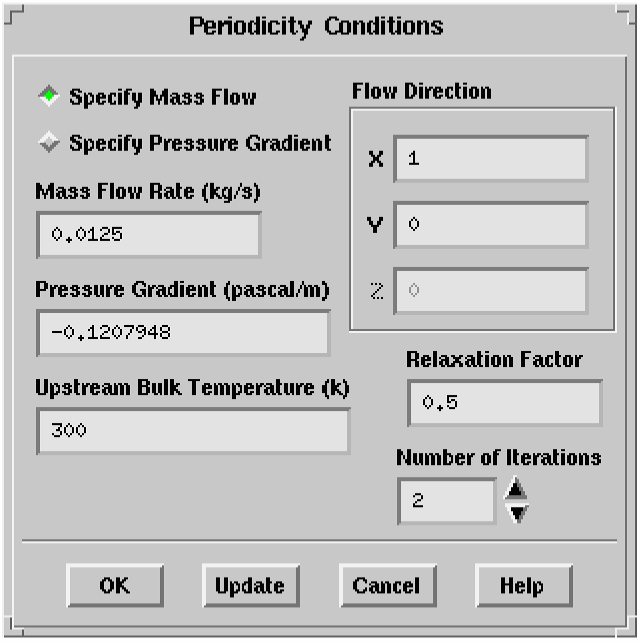


Figure 1: 周期性条件面板

1. 选择指定质量流速选项或者指定压力梯度选项。对于大多数问题，通过周期性边界的质量流速是已知的，如果质量流速未知，压力梯度也将会是已知的量。
2. 指定质量流速和/或指定压力梯度：
   - 如果指定质量流速，请输入相应的数值。你还可以输入出示压力梯度的猜测值，但不是必需的。需要注意的是，对于轴对称流动，质量流动速度是每 2p 的质量流速
   - 如果指定压力梯度，请输入压力梯度的数值。
3. 在流动方向框中分别输入 X，Y 和 Z 的值作为方向矢量。此是流动就会从起始点沿着指定的方向到达指定点。流动方向必须是平行于周期性平移方向或者反向。
4. 如果在第一步中选择质量流速，请输入计算 b 的相应的参数。这些参数的输入可以参阅使用分离解算器计算流向周期性流动的用户输入一节。

完成上述输入之后，你就可以计算周期性速度场直到收敛了。

如果指定质量流速，FLUENT 需要计算压力梯度 b 的适当值。你不可以通过指定松弛因子、迭代次数或压力梯度初始猜测值来控制压力梯度的计算。所有的这些输入都在周期性条件面板中完成。

迭代次数设定了压力校正方程中校正 b 的子迭代次数。因为 b 的值无法预先知道，所以在计算模型中，你必须在定义的质量流速计算之后才会完成 b 的迭代。B 的校正出现在 SIPLE 或者 SIMPLEC 算法的压力校正步中。对 b 的当前值的校正是基于预期质量流速和实际质量流速之间的差值的。此出涉及的子迭代是在压力校正步中完成的，目的是为了提高在解校正方程获得压力（和速度）校正值之前提高 b 的校正质量。默认的子迭代次数为 2，它可以满足大多数问题，但是可以增加它以获取快速的收敛。松弛因子在此处是压松弛因子，它控制了迭代过程的收敛。

你可以在压力梯度框中输入猜测的初始压力梯度来提高周期性计算的收敛速度。如果你完成了任何计算，这个框会显示当前的 b 值。要用当前的数值更新压力梯度框，你可以点击更新按钮。

使用耦合解算器计算流向周期性流动的用户输入

如果你使用某一耦合解算器，为了计算具有指定压力跳跃的空间周期性流场，你首先要创建具有平移性边界条件的网格，这些网格相互平行，尺寸相等。（如果需要创建周期性边界，请参阅创建周期性区域一节）。然后遵循如下步骤：

1. 在边界条件面板中打开周期性面板(Figure 1)，选择平移性周期（默认）。菜单：Define/Boundary Conditions...。

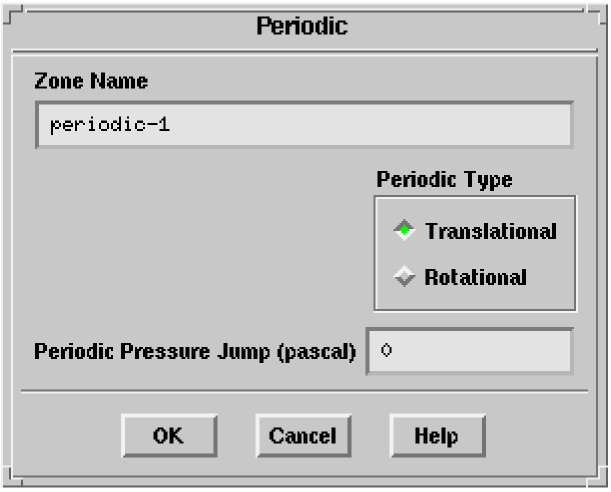


Figure 1:周期性面板

2. 在周期性面板中设定周期性压力跳跃 D p。

   完成上述输入可以开始计算直至收敛。

检测压力梯度的值

如果指定质量流速，你可以在解的过程中监视压力梯度的数值。具体方法：打开静态监视面板，选择 per/pr-grad 作为监视变量。详情请参阅静态监视一节。

流向周期性流动的后处理

速度和压力场的结果应该完全是周期性的。如果用耦合解算器计算周期性流动，压力场的报告将是真实压力 p 的报告。如果使用分离解算器，FLUENT 所报告的压力场将会是方程 5 中的周期性压力场 p (r)。下图显示的是概述一节中的几何图形中的周期性压力场。

如果指定质量流量并要 FLUENT 计算压力梯度，你可以在周期性条件面板中查找流向压力梯度（b）的当前值。

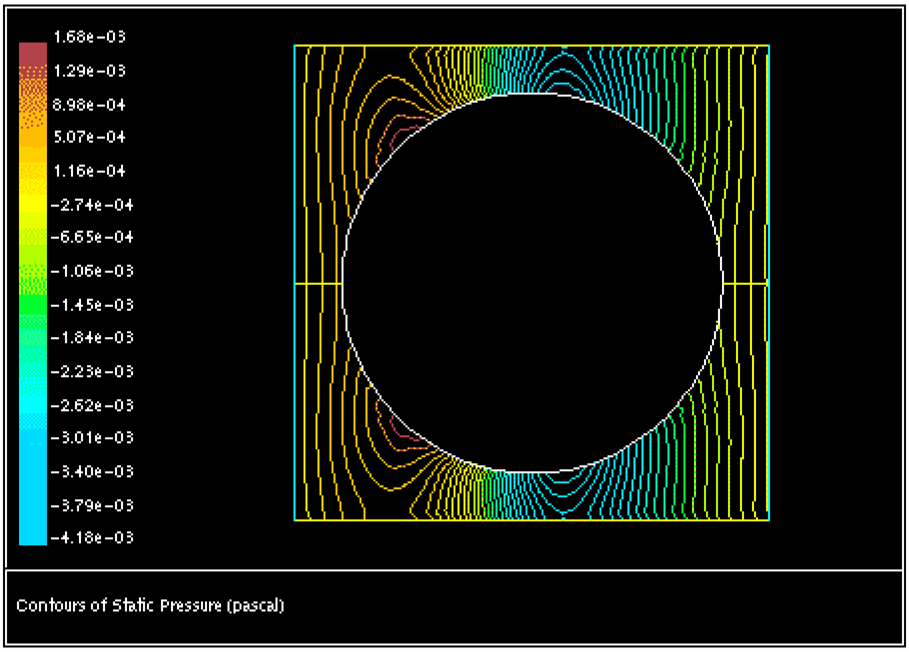


Figure 1: 二维热交换几何图形的周期性压力场预测

指定温度边界条件的周期性热传导

FLUENT 可以解决两类热传导问题：与常数温度壁面具有热交换的流向周期性流动是 FLUENT 可以解决的一种周期性热传导问题。另一种可以解决的是具有指定壁面热流量的流动，具体可以参阅具有指定热流量条件的周期性热传导一节。

注意：只有在使用分离解算器时才可以模拟周期性热传导。

常数壁面温度条件的周期性热传导方程

对于常数壁面温度，当流体通过周期性区域时，其温度接近壁面边界的温度。但是温度可以用具有周期性行为来衡量。对于具有常数壁面温度的周期性流动，对温度较合适的度量为[119]：

$$\theta = \frac{T(\vec{r}) - T_{wall}}{T_{bulk,inlet} - T_{wall}}$$

体积温度 T_bulk,inlet 定义为：

$$T_{bulk,inlet} = \frac{\int_A T\left|\rho d\vec{V} \cdot d\vec{A}\right|}{\int_A \left|\rho d\vec{V} \cdot d\vec{A}\right|}$$

其中积分是对整个入口周期性边界（A）的积分。正是规定的温度 q 服从通过长度为 L 的周期性条件。

常数壁面温度周期性热传导的用户输入

为了模拟周期性热传导，你需要参照使用分离解算器模拟流向周期流动所需用户输入一节所介绍的方法来设定你的周期性模型，同时要注意概述中所提出的限制。除此之外，你需

要提供如下与热传导模型相关的信息：

1. 在能量面板中激活能量方程解。菜单：Define/Models/Energy...。
2. 在各自的壁面面板为每一个壁面边界设定边温度 T_wall。注意：所有的壁面边界必须分配相同的温度，而且整个流场（除了周期性边界）必须由固定温度条件或者对称或零热流量边界来封闭不同的壁面边界。菜单：Define/Boundary Conditions...
3. 合适的话，定义固体区域。假如在区域的周边由固定温度条件封闭，你可以在区域内使用传导性固体区域。当你使用固定温度条件解周期性热传导时，固体区域内不可以有热生成。菜单：Define/Boundary Conditions...
4. 设定常数流体属性（密度，热容，粘性，热传导系数，而不是在使用材料面板的 1 中定义温度相关流体属性）。菜单：Define/Materials...
5. 在周期性面板中指定逆流体积温度。（体积温度不能等于壁面温度，因为它会给出常数温度在任何位置的价值不高的解。）菜单：Define/Periodic Conditions...。

周期性热传导的解策略

完成了周期性热传导常数壁面温度的用户输入之后，你就可以解决流动和热传导问题直至收敛。最为有效的解决方法是首先解没有热传导的周期性流动，然后不改变流场来解热传导问题，具体步骤如下：

1. 在解控制面板中关闭能量方程选项。菜单：Solve/Controls/Solution...。
2. 解剩下的方程（连续性，动量以及湍流参数（可选））来获取收敛的周期性流动的流场解。

注意，当你在开始计算之前初始化流场时，请使用入口体积温度和壁面温度的平均值作为流场的初始温度。

3. 回到解控制面板，关闭流动方程打开能量方程。
4. 解能量方程直至收敛获取周期性温度场。

当同时考虑流动和热传导来解决周期性流动和热传导问题时，你就会发现上面所介绍的方法相当有效。

监视收敛性

为了保证得到收敛解，你可以监测体积温度比的值：

$$\theta = \frac{T_{wall} - T_{bulk,inlet}}{T_{wall} - T_{bulk,exit}}$$

在计算过程中，打开静态监测面板，选择 per/bulk-temp-ratio 作为监测变量。详情请参阅静态监测一节。

固定温度条件的周期性热传导的后处理

在周期性模型中，由 FLUENT 所计算出的温度常将不会是周期性的，而且在后处理中察看温度结果时，FLUENT 会显示常数壁面温度度条件下周期性热传导方程 1 中的真实温度场。所显示的温度可能会超出入口体积温度和壁面温度定义的范围。这种情况是允许的，因为在入口周期性表面处的真实温度轮廓可能会不等于入口体积温度。

在后处理面板中，我们可以在变量选择下拉列表的温度类别中找到静温选项：下图所示为周期性热交换器的温度常。

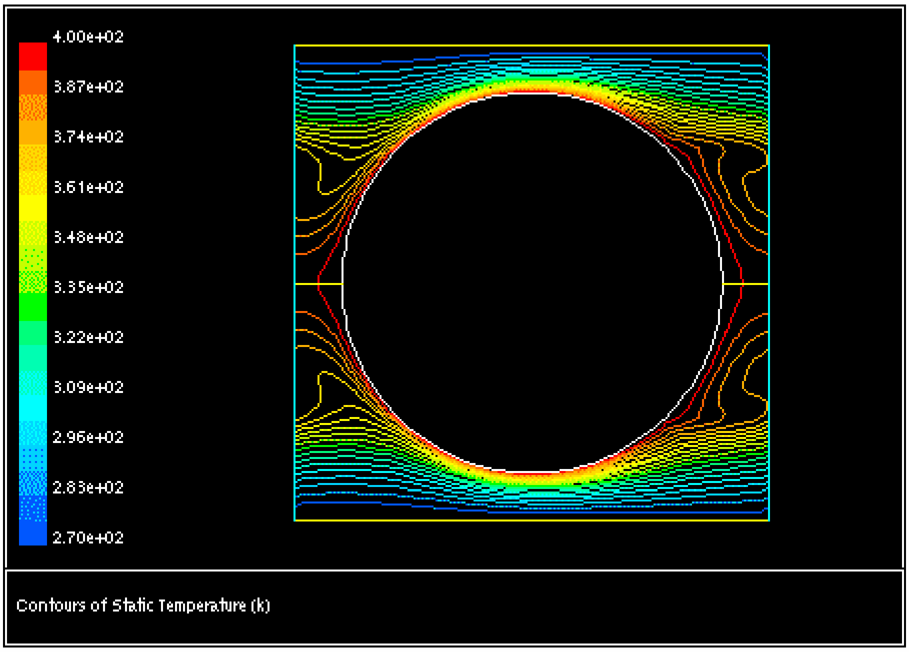


Figure 1: 具有固定温度边界条件的二维热交换器的温度场

指定热流量条件的周期性热传导

当指定热流量条件时，我们可以获得周期性完全发展的温度场。在这种情况下，周期性边界之间的温度交换变成了常数，而且从边界处获取的热量的净增量有关。这个边界是指本节所介绍的边界。

只有在使用分离解算器时才可以模拟周期性热传导。

指定热流量条件的周期性热传导方程

当考虑具有热流量条件的周期性热传导，非按尺度增加的温度场的形式变得和周期性流动的压力场相似

$$\frac{T(\vec{r})-T(\vec{r}+\vec{L})}{L}=\frac{T(\vec{r}+\vec{L})-T(\vec{r}+2\vec{L})}{L}=\sigma.$$

其中 L 是区域内周期性长度矢量。温度梯度 s 与区域内部总的热量增加 Q 的关系为：

$$\sigma=\frac{Q}{\dot{m}c_pL}=\frac{T_{bulk,exit}-T_{bulk,inlet}}{L}$$

其中 m(dot)是指定的或者计算的质量流速。

指定热流量周期性热传导的用户输入

为了模拟周期性热传导，你需要遵照使用分离解算器计算流向周期性流动所需用户输入一节中介绍的方法来设定周期性模型，只是要注意一下引言中所讨论的限制条件。除此之外，你需要为热传导模型提供下面的相关输入：

1. 在能量面板中激活能量方程解。菜单：Define/Models/Energy...。
2. 在壁面面板为每一个壁面设定热流量。不同的壁面边界可以定义不同的热流量值，待是在该区域内部不可以有其它的热边界条件。菜单：Define/Boundary Conditions...
3. 合适的话，定义固体区域。你可以在区域内任何位置定义传导性固体区域，需要的话还可以包括固体内部体积热的增加。菜单：Define/Boundary Conditions...
4. 设定常数流体属性（密度，热容，粘性，热传导系数，而不是在使用材料面板的 1 中定义温度相关流体属性）。菜单：Define/Materials...
5. 在周期性面板中指定逆流体积温度。菜单：Define/Periodic Conditions...。

解决周期性热传导问题

完成上面的输入之后，你就可以解决流动和热传导问题直至收敛。然而最为有效的解决方法应该遵循：首先解没有热传导的周期性流动，然后不改变流场来解热传导。这一步骤的具体介绍可以参阅周期性热传导的解策略一节。

指定流量条件的周期性热传导的后处理

具有指定热流量的周期性流动的后处理和指定温度条件的周期性流动的后处理相同。具体可以参阅固定温度的周期性热传导的后处理一节。

涡流和旋转流动

在许多重要的工程问题中都包括涡流和旋转，FLUENT 很适合模拟这些流动。在燃烧中涡流是很常见的，为了增加滞留时间和流动模式的稳定性，在喷嘴和燃烧室中需要诱导涡流。在涡轮机，混合箱和各种各样的其它应用中都存在旋转流动问题。

在对涡流和旋转流动分析之前，你首先要对所解决的问题进行大致的分类，一般有如下五种流动类别：

- 涡流和旋转流的轴对称流动
- 完全的三维涡流或旋转流动
- 需要旋转参考系的的流动
- 需要多重旋转参考系或混合平面的流动
- 需要滑动网格的流动

本节将会介绍前两类问题的模拟和解决过程。剩下的问题都包括移动壁面问题，我们将会在移动壁面中的流动一节讨论。

旋转流动和涡流的概述

涡流和旋转流动的轴对称流动

你的问题可能是关于几何图形与边界条件为轴对称的，但是仍然包括旋转和涡流。在这种情况下，你可以在模拟二维流动（即解决轴对称问题），并包括圆周速度（或涡流）的预测。需要注意的是，轴对称假定隐含了流动中没有周向梯度，但是仍然有非零的涡流速度。

二维涡流的切向动量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho uw)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho vw)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\frac{\partial w}{\partial x}\right]$$
$$+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^3\mu\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{w}{r}\right)\right]-\rho\frac{vw}{r}$$

其中 x 是坐标轴，r 是径向坐标，u 是轴向速度，v 是径向速度，w 是漩涡速度。

三维涡流

当几何图形有变化和/或具有周向流动梯度时，你需要用三维模型预测漩涡流动。如果你使用的三维模型中包括了涡流和旋转流动，你必须注意坐标系限制。除此之外你可能还会考虑将问题简化为一个等价的轴对称问题，尤其是对初始的模拟计算。初始的二维研究可以很快确定各种模拟和设计的选项的影响，所以它对我们模拟涡流的复杂性很有帮助。
对于包含涡流和旋转的三维问题，在问题的设定过程中没有什么特别需要输入的内容，也没有特别的解的程序。但是需要注意的是，在定义速度入口边界条件的输入时，你可能需要使用柱坐标系，具体可以参阅定义速度一节。而且你会发现在解的过程中旋转速度（设定为壁面或入口边界条件）的缓慢增加是非常有用的。在轴对称涡流的解策略一节中，描述了轴对称涡流的这方面内容。

需要旋转参考系的流动

如果你的流动包括了通过流体的旋转边界（如螺旋桨叶片或者沟槽或者锯齿状曲面），你就需要使用旋转参考系来模拟这类问题。旋转参考系中的流动一节详细介绍了这方面的应用。如果有不止一个旋转边界（比如说有一排螺旋桨），你可以使用多重参考系（MRF）或者混合平面。多重参考系模型一节介绍了多重参考系的相关内容，混合平面模型一节介绍了混合平面的相关内容。

涡流和旋转流动的物理描述

在涡流中，角动量守恒(r w or r^2 W = constant)往往导致了新的自由涡流动的产生，在自由涡流动中，周向速度 w 随着半径 r 的减小而急剧增加，在半径为零的附近由于粘性力占主导地位，w 减小到零。龙卷风就是自由涡的一个典型例子。下图是一个自由涡周向速度和半径 r 的关系图。

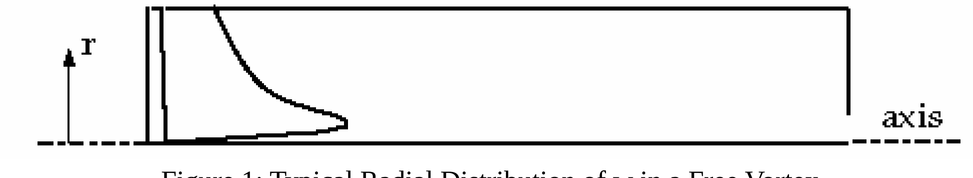


Figure 1: Typical Radial Distribution of w in a Free Vortex

可以看出，对于理想自由涡流动，有圆周运动所产生的离心力和径向压力梯度是平衡的。

$$\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{\rho w^2}{r}$$

在非理想涡角动量分布变化时，径向压力梯度也会相应的变化，从而驱动径向和轴向流动来响应梯度变化所导致的非同一压力。因此当你计算 FLUENT 模型中的涡流的分布时，

你还要注意静压分布的变化以及相应的轴向和径向流动速度的变化。涡流和压力场之间的高度耦合时的涡流的模拟相当的复杂。

在壁面旋转驱动的流动中，壁面的运动常常会造成流体的受迫的涡运动，其中的 w / r 或者 W 为常数。这种流动最重要的特征就是流体倾向于具有很高的角动量（如：近壁面的流动）而被沿径向甩出（Figure 2）。因为旋转壁面将流体沿径向向外抽吸，所以这种现象常被称为“径向抽吸”。

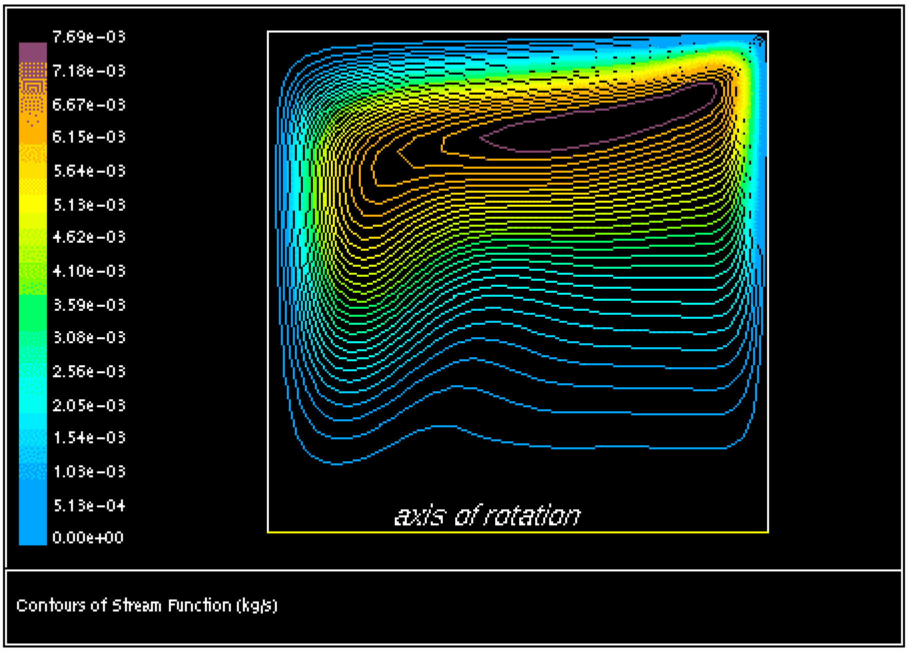


Figure 2: 空腔内旋转流动流函数的等值线（具有旋转或涡流的轴对称流动一节中 Figure 1 的几何图形）

涡流中的湍流模型

如果模拟具有大量漩涡的湍流流动（如：气旋流动，漩涡射流），你应该使用某一种高级湍流模型：RNG k-e 模型，可实行的 k-e 模型或者雷诺应力模型。选择哪种模型依赖于涡的强度，它可以用漩涡的数量来度量。漩涡数量定义为角动量轴向流量与轴向流量动量的比值：

$$S = \frac{\int rwv \cdot dA}{R\int uv \cdot dA}$$

其中，R(bar)是水力学半径。

对于较弱的中等涡流（$S < 0.5$），RNG k-e 模型和可实行的 k-e 模型比标准 k-e 要好一些。这些方法的详细描述可以参阅可实行的 k-e 模型和涡流修改一节。

对于强度较高的漩涡流动（$S > 0.5$），推荐使用雷诺应力（RSM）模型。高强度湍流的各项异性的影响只需要用 RSM 中采用的二动量闭合就可以严格模拟。关于本模型的详细设定请参阅雷诺应力模型和湍流流动问题的设定一节。

对于装置中遇到的涡流，如气旋分离器和漩涡燃烧室，近壁面湍流模拟常常是次要的问题。在这些算例中问题的可信度主要由核心区域湍流模型的的精度决定。但是在对于壁面在涡的生成过程中作用较大时（即：次要的流动和涡流是由压力产生时），非平衡壁面函数常

常可以提高预测的准确度，其原因在于它使用对压力敏感的平均速度的壁面定律。具体可以参阅壁面限制湍流流动的壁面处理中有关湍流近壁面处理的内容。

涡流和旋转流动的网格设定

坐标系的限制

大家应该还记得，对于轴对称问题，旋转轴必须是 x 轴，网格必须在直线 y=0 上或上方。具体可以参阅网格一章。

涡流和旋转流动的网格敏感性

除了坐标系限制之外，你还要注意在解决包括涡流和旋转的问题时你的网格应该有足够的分辨率。最为典型的就是旋转边界层，它会特别薄，因此你的 FLUENT 模型需要在旋转壁面处有相当精细的网格。除此之外，涡流的周向速度通常有很大的梯度（比如说自由涡流动接近中线的区域），此时也需要网格具有很高的分辨率。

具有涡流或旋转流动的轴对称流动

如旋转和涡流概述一节所讨论的，你可以解包括圆周和涡流速度预测的二维轴对称问题。轴对称假设暗含了流动没有周向梯度，但是可能有非零的周向速度。下面两个图就是包含涡流或者旋转的轴对称流动的例子：

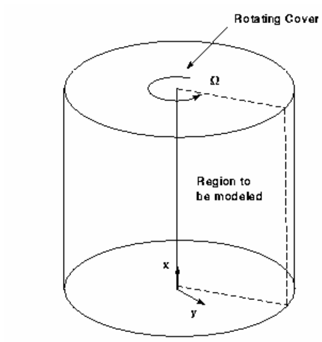


Figure 1: 空腔内的旋转流动

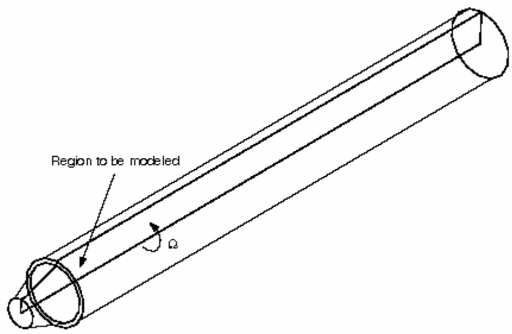


Figure 2: 气体燃烧室内的涡流

轴对称涡流的问题的设定

对于轴对称问题，你需要在问题设定时执行下面的步骤（其它的与轴对称涡流或旋转流动无关步骤和其它的问题设定一样）：

1. 在解面板中打开轴对称涡流选项，激活圆周方向的动量方程解。菜单 Define/Models ?Solver...
2. 在入口或壁面处定义速度的旋转或涡流分量 r W。菜单：Define/Boundary Conditions...

注意：对于旋转轴要记住所使用的轴边界类型。

在移动壁面处定义速度和定义速度条件一节将会详细介绍在入口处和壁面处旋转速度输入的步骤。

轴对称涡流的解策略

与解涡流和旋转流动相关的困难就是动量方程的高度耦合性，它是旋转项的影响过大所致。高度的旋转导致了驱动轴向和径向流动的较大径向压力梯度。这按顺序确定了流场的涡流和旋转。耦合可能会导致流动解的不稳定，所以为了获取收敛解需要采用特定的技巧。下面是解涡流和旋转流动的解技巧：

- （只用于分离解算器）如果使用四边形或六面体网格，你需要使用 PRESTO!格式（在解控制面板的离散的压力列表中），它很适合于解决涡流中具有很大压力梯度的流动。
- 确保网格在压力和漩涡速度较大梯度的地方具有足够的解析度。
- （只用于分离解算器）改变速度的亚松驰参数，对于旋转流动可能是 0.3--0.5，对于涡流可能是 0.8--1.0。
- （只用于分离解算器）使用顺序的或者步进解，在这些解法中有些方程暂时是未被激活的（请参阅轴对称涡流的解策略一节）。
- 必要的话，开始计算时采用较低的旋转速度或涡流速度，然后逐渐增加直至所需要的操作条件（请参阅轴对称涡流的解策略一节）。

关于解参数的改变请参阅使用解算器一章。下面详细介绍了步进程序和旋转速度逐渐增加的方法。

一般说来，如果你使用下面的步进解方法很容易解高度的涡流和旋转流动，在步进解中的每一步只有所选的方程是被激活的。该方法允许你建立角动量场，然后在更新速度场时固定角动量场，最后同时解所有的方程将两个场耦合。

注意：因为耦合解算器同时解所有的方程，所以下面的方法只应用于分离解算器。

在这些方法中，你需要使用解控制面板中的方程列表来打开和关闭个别的输运方程。

1. 如果你的问题包括质量流入和/或流出，首先开始计算没有旋转和涡流影响的流动。也就是说在解控制面板中激活轴对称选项而不是轴对称涡流选项，然后不设定任何旋转边界条件。所得的流场数据结果可用于完全问题的初始猜测。
2. 激活轴对称涡流选项，然后设定所有的旋转/涡流边界条件。
3. 首先只解描述圆周速度的动量方程来预测旋转/涡流流动。该项列于解控制面板的方程列表中的旋转速度选项。在边界条件输入的基础上让旋转在整个流场“扩散”。在湍流模拟中，你可能还要在这一步中让湍流方程也激活。这一步在整个流场中建立了旋转场。
4. 关闭描述旋转运动（涡流速度）的动量方程。固定周向速度，在其它坐标方向上解动量和连续性（压力）方程（解控制面板的方程列表中的流动）。这一步将会建立流场中由于旋转而导致的轴向和径向速度。如果你的问题还包括湍流流动，在这一步计算时你要保持激活湍流方程。

5. 同时打开所有的方程获取完全的耦合解。要注意轴对称涡流解策略中关于亚松驰控制的介绍。

除了上述步骤之外，在增加热传导之前，你可能需要通过解等温流动来简化你的计算，在增加湍流模型之前时，你可能需要先解层流流动。这两种方法可以用于任何解算器（分离解算器、耦合解算器）。

因为边界条件中定义的旋转或涡流会导致流动中出现较大的较复杂的力，所以当旋转速度或者涡流角度增加时，你的 FLUENT 计算可能稳定性会变差。因此，解决这类问题最为行之有效的方法就是，在开始的时候用较低的旋转速度或者漩涡速度解决问题，然后逐渐增加它们的大小直至所需要的标准。具体做法如下：

1. 在边界条件的设定中，用较低的旋转速度或涡流速度设定问题。在第一次尝试时，旋转和涡流一般选定为真实操作条件的 10%。
2. 在这些条件下解决问题。此时可能要使用轴对称涡流解策略一节中介绍的步进解方法。
3. 保存初始解数据。
4. 修改输入（边界条件）。增加旋转速度，可能用双倍的速度。
5. 用第三步得到的解重新开始计算。保存新的数据。
6. 继续增加旋转速度，重复第四第五步直到达到所需的操作条件。

轴对称涡流的后处理

轴对称流动结果的报告和其它流动一样。当激活轴对称涡流时，在后处理过程中可以处理下面的附加变量：

- 漩涡速度（在速度类别中）。
- 漩涡壁面剪切应力（在壁面流量类别中）

可压流动

在高速流动或者压力变化剧烈的流动中会遇到压缩性影响。当流体流动速度接近或者大于气体的声速时或者系统的压力变化 D p /p 较大时，气体随压力变化密度会对流动速度、温度有较大的影响。可压缩性流动具有独特的物理性质，本节将会介绍载客压缩性流动中你必须注意的特定的输入和解的技巧。下面两个图是用 FLUENT 计算的两个可压缩流动的例子。

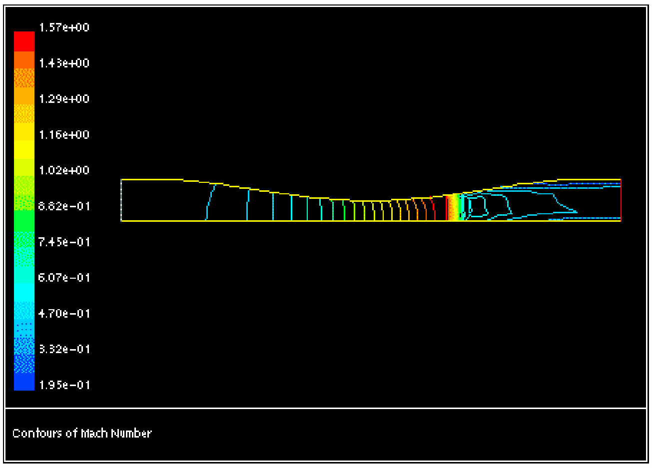


Figure 1:收缩扩张喷管的跨声速流动

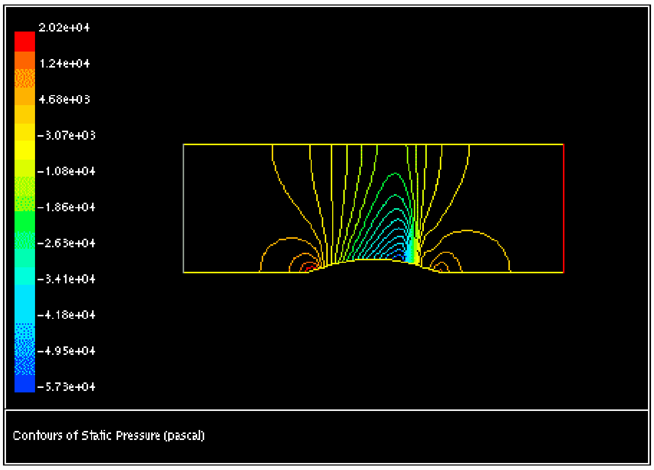


Figure 2: 二维管道上突起的马赫数为 0.675 的流动

可压缩性流动可以用马赫数来表征

$$M = u/c$$

其中 c 是气体的声速

$$c = \sqrt{\gamma RT}$$

其中 c 是气体的比热比 c_p/c_v

马赫数小于一为亚声速。当马赫数远小于一时（M < 0.1），可压缩性影响可以忽略，在模拟中气体密度随压力的变化可以忽略。当马赫数接近一时（被称为跨声速流动区域），可压缩性影响变得越来越重要了。当马赫数达于一时，称为超声速流动，其中可能会包含激波或者膨胀波，它们会对流动有较大的影响。FLUENT 可以模拟压声速，跨声速和超声速流动的很大范围内的可压缩流动。

可压流动的物理描述

可压缩性流动最为典型的是使用总压 p_0 和总温 T_0 来描述。对于理想气体，总压、总温和静压、静温的关系为：

$$\frac{p_0}{p_s} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$\frac{T_0}{T_s} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2$$

这些关系是表示在等熵条件下流动的静压和静温和流动速度（马赫数）的变化关系。比方说：给定入口和出口的压力比（总压除以静压），上面的方程 1 可用于估计一维等熵流的出口马赫数。对于空气来说，方程 1 预测阻赛流动（马赫数为一处）的等熵压力比 p_s/p_0 为 0.5283。阻赛流动条件出现在流动截面最小的点处（比方说：喷管的喉部）。在后面的扩张流动中，如果是超音速流，流动速度会加快，压力继续下降，如果是亚声速流动，流动速度会减慢并伴随着压力的升高。如果超声速流动受到压力升高的阻碍就会产生激波，通过激波之后压力会有很大的下降。

可压流动的基本方程

可压缩性流动用 Fluent 所解的标准连续性和动量方程来描述，你不必设定任何特殊的物理模型（除了气体定律的可压缩性形式一节中介绍的密度的可压缩性处理。FLUENT 所解的能量方程很好的处理了流动速度和静温之间的耦合，不管你什么时候解可压缩性流动都必须激活能量方程。除此之外，如果你使用分离解算器，你需要激活能量方程一节中方程 1 的粘性耗散项，该项在高马赫数流动中会变得很重要。

气体定律的可压形式

对于可压缩性流动，理想气体定律的形式为：

$$\rho = \left(p_{op} - p\right) / RT_s$$

其中 p_op 是操作条件面板中定义的操作压力，p 是相对于操作压力的当地静压。气体常数从你所输入的分子量计算出来，温度 T_s 从能量方程中计算出来。

可压流动所需的模型输入

在 FLUENT 中设定可压流动步骤如下：

1. 在操作条件面板中设定操作压力。菜单：Define/Operating Conditions...。（你可以认为 p_op 为流动中标准压力 p 为零的点处的绝对静压。）
2. 在能量面板中激活能量方程的解。菜单：Define/Models ?Energy...。
3. （只用于分离解算器）如果模拟湍流流动，请在粘性面板打开粘性热传导来激活能量方程的粘性耗散项。这些项在高速流动中可能会十分重要。菜单：Define/Models/Viscous...。

！如果使用耦合解算器这一步就不必要了，因为耦合解算器在能量方程中总是包含粘性耗散项。

4. 在使用材料面板中设定下面几项。菜单：Define/Materials...
    1. 在密度后面的下拉菜单中选择理想气体
    2. 定义所有的相关属性（比热，分子量，热传导系数等）。
5. 设定边界条件，要确保边界条件与流动区域很好的结合。详情请参阅可压流动的边界条件一节。必须记住，所有的压力输入（总压或静压）都必须是相对于操作压力而言的，入口处的温度必须是总温（驻点温度）而不是静温。菜单：Define/Boundary Conditions...

这些输入应该能够较好的描述可压缩流动问题。在计算之前你可能要考虑特定的解的参数的设定，具体可以参阅可压流动的解策略一节。

可压流动的边界条件

可压流动入口处口边界条件的提法如下：

- 对流动入口：
    - 压力入口：入口总温和入口总压，如果是超声速入口还有静压。
    - 质量入口：入口质量流动和总温
- 对流动出口：
    - 压力出口：出口静压（如果是超声速流动此项忽略）

一定要记住，边界条件的压力输入（总压或静压）必须是根据标准压力，也就是操作条件面板中定义的操作压力来设定的。具体可以参阅可压流动建模所需要的输入一节。入口处的所有温度输入都必须是总温（驻点温度）而不是静温。

可压流动的解策略

解决可压缩流动主要难点在于速度、密度、压力和能量之间的高度耦合。耦合可能会导致解的不稳定，所以为了得到收敛解需要特定解决技巧。除此之外，激波（间断面）的产生可能会导致计算中出现其它的不稳定性问题。下面介绍一下可能会对计算有帮助的几个技巧：

- （只用于分离解算器）对速度使用守恒的亚松驰参数，大约为 0.2 或者 0.3。
- （只用于分离解算器）设定压力的亚松驰约为 0.1 并使用 SIMPLE 算法。一定要注意对于可压缩流动不能使用 SIMPLEC 或者 PISO 算法。
- 在解限制面板中设定温度和压力的极限以避免解的发散，尤其是初始解的发散。如果 FLUENT 的消息输出被限制的温度或者压力作为接近收敛的解，那么你就需要改变限制的范围，因为较高或较低的计算值可能是物理解。
- 如果需要的话，开始解决问题时在边界处使用减小的压力比，然后增加压力比直至达到所需的操作条件。虽然不可压流动解在某些情况下可能是对可压流动较差的猜测，你还是可以考虑从不可压流动解开始计算可压流动解。
- 在某些情况下从无粘流动开始计算可能很有帮助。

关于这些解参数的具体的改变步骤的详细介绍可以参阅解算器使用一章。

可压流动结果的报告

你可以使用和不可压流动一样的方式来显示可压流动的计算结果。当模拟可压流动时，下面的变量尤为重要：

- 总温
- 总压
- 马赫数

在后处理面板的变量选择下拉列表中包含了这些变量。总温在温度类别中，总压在压力类别中，马赫数在速度类别中。关于它们的定义可以参阅流场函数定义一节。

无粘流动

无粘流动分析不考虑粘性影响，而且很适合于处理高雷诺数应用问题中惯性力由区域粘性力主导的情况。高速导弹气动分析就是较为合适的无粘流动的例子。像这样的例子物体上压力远远大于粘性力。因此，无粘流动分析可以很快的给出作用于物体上的力的初步估计。当改变物体外形来最小化升力或者阻力，你就可以考虑在升力和阻力中流体粘性和湍流粘性的影响来进行粘性分析。

无粘流动另一个常用的领域是，对包含复杂物理现象或者复杂流动几何外形流动进行分析，从而给出初始解。在这种情况下，粘性力是很重要的，但是在初期计算时会忽略动量方程粘性项。一旦计算已经开始而且残差开始减小，你就可以打开粘性项（通过激活层流或湍流流动）继续计算直至收敛。对于一些复杂流动，这是唯一可以开始计算的方法。

欧拉方程

对于无粘流，FLUENT 解欧拉方程。质量守恒方程和层流流动的一样，但是动量方程和能量方程因为忽略了分子扩散项而得到化简。

本节的无粘流动方程是在惯性（无旋转）参考系中的。后面几节将会介绍组分输运和其它模型相关的守恒方程。对于非惯性系的应用请参阅移动区域中的流动一章。

质量守恒方程

质量守恒或者连续性方程可以写成：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\right)=S_m$$

该方程是质量守恒方程的一般形式，适用于不可压流和可压流。源项 S_m 是从散布的二级相加入到连续相中的质量（如：液滴的蒸发）以及自定义的源项。

对于二维轴对称问题，连续性方程由下式给出：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v)\frac{\rho v}{r}=S_m$$

其中 x 是轴坐标，r 是径坐标，u 是轴向速度，v 是径向速度。

动量守恒方程

i 向动量守恒方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u_i\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\rho g_i+F_i$$

其中 p 是静压，r g_i 和 F_i 分别是 i 向的重力体积力和外部体积力（如离散相之间的相互作用而产生的力）。F_i 还包括其它的模型相关源项，比如多孔介质或者自定义源项。

对于二维轴对称几何图形，轴向和径向动量守恒方程分别为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho u u)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v u)=-\frac{\partial p}{\partial x}+F_x$$

以及:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho u v)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v v)=-\frac{\partial p}{\partial r}+F_r$$

其中：

$$\nabla\cdot\vec{v}=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{v}{r}$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_i\left(\rho E+p\right)\right)=-\frac{\partial}{\partial x_i}\sum_{j'}h_{j'}J_{j'}+S_h$$

设定无粘流动的模型

对于无粘流动，在问题设定过程中你需要执行如下步骤（只列出与无粘流动相关的设定，其它的问题你还要进行相关设定。

1. 在粘性模型面板中选择无粘来激活无粘流动的计算。菜单：Define/Models/Viscous...。
2. 设定边界条件和流动属性。菜单：Define/Boundary Conditions...以及 Define/Materials...。
3. 解决问题并检查结果。

解决无粘流动模型的解策略

因为无粘流动中通常包括高速流动，所以，如果你使用分离解算器，你需要减小动量的亚松驰因子；如果你使用耦合解算器，为了开始解算你还要设定 Courant 数。一旦开始计算，并且残差开始减少，你就可以逐渐将亚松驰因子或 Courant 数恢复到默认值。

亚松驰因子和 Courant 数的修改可以在解控制面板中进行。菜单：Solve/Controls/Solution...。

可压流动的解策略也要用到无粘流动中。具体可以参阅可压流动的解策略一节。

无粘流动的后处理

如果你对作用于模型上的升力和阻力感兴趣，你可以使用力报告面板来计算它们。详情请参阅边界处的力一节。

时间相关模拟

FLUENT 可以解决质量、动量、能量、组分及其它标量的守恒方程的时间相关形式。它可以解决很大范围的时间相关现象，如：

- 涡的脱落和其它时间相关现象
- 压缩注入和倾倒问题
- 瞬时热传导
- 瞬时的化学混合与反应

下面两个图是圆柱绕流尾迹的时间相关涡的脱落的图案：

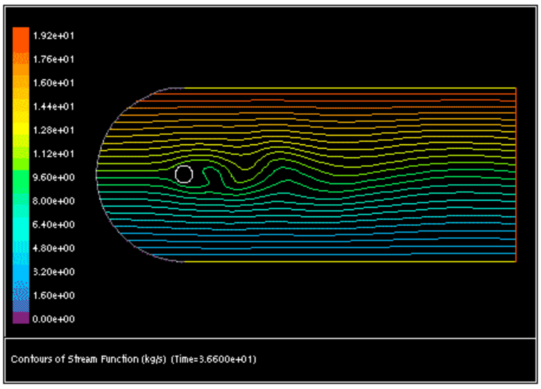


Figure 1: Time = 3.66 sec

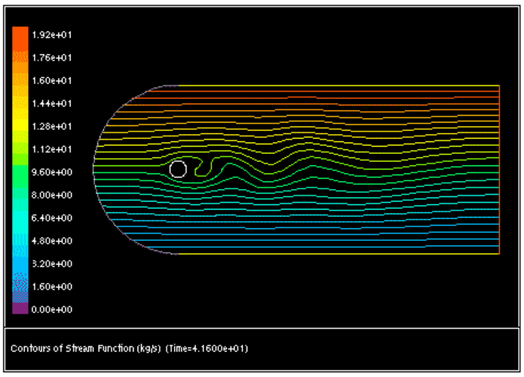


Figure 2: Time = 41.6 sec

当解决区域不稳定的定常状态问题（如：雷诺数接近过渡区域的自然对流问题），激活时间相关通常是很有帮助的。通过积分时间相关方程在很多情况下都可以获得定常解。

时间离散

在 FLUENT 中时间相关方程必须在时间和空间中离散。时间相关方程的空间离散和定常状态（见离散一节）的离散是一样的。时间离散包括微分方程中每一项关于时间步 D t 的积分。瞬时项的积分是很简单的，如下所示：

变量 f 随时间变化的一半表达式为：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi)$$

其中函数 F 为任何空间离散的合并。如果用后向差分来离散时间导数，一阶精度的时间离散为：

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^{n}}{\Delta t} = F(\phi)$$

二阶离散为：

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^{n} + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi)$$

其中

f　=　标量

n+1 =　下一个时间步（t + D t）的值

n　=　当前时间（t）的值

n-1 =　上一个时间步（t - D t）的值

一旦时间导数被离散，还需要选择 F(f)的估值：尤其是在估计 F(f)时要用到时间步中的 f 值的情况

隐式时间积分

一个方法就是在将来时间步中估计 F(f)的值：

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^{n}}{\Delta t} = F\left(\phi^{n+1}\right)$$

因为在给定单元中的 f^n+1 和通过 F(f^n+1)的邻近单元的 f^n+1 有关，所以它被称为隐式积分：

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F\left(\phi^{n+1}\right)$$

该隐式方程可以通过重复的初始化 f^i 到 f^n 并迭代下面的方程直至 f^i 不再变化（即：收敛 f^n+1 =f^i）而解出：

$$\phi^i = \phi^n + \Delta t F\left(\phi^i\right)$$

此格式为一阶格式

$$\phi^i = 4/3\phi^n - 1/3\phi^{n-1} + 2/3\Delta t F\left(\phi^i\right)$$

此格式为二阶隐式格式。

全隐格式的优点是它关于时间步无条件稳定。

显式时间积分

当使用耦合显式解算器时可以用二阶方法。该方法在当前的时间步中估计 F(f)的值：

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F\left(\phi^n\right)$$

它被称为显式积分，这是因为 f^n+1 可以根据已有的解 f^n 来明确表示：

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F\left(\phi^n\right)$$

（该方法和 RAMPANT 中的全局时间步方法等价。）

在这里，时间步 D t 受到解算器稳定性极限的限制（即：时间步对应的 courant 数近似为 1）。为了保证时间精度，区域内所有的单元都必须使用相同的时间步。出于稳定性考虑，时间步必须是区域内所有当地时间步的最小值。

显式时间步的使用时有很多限制的。它主要用于捕捉移动波（如激波）的过渡行为，这是因为在这种情况下，它比隐式时间步更精确也更省时。在下面的几种情况中，你不可以使用显式时间步进：

- 使用分离或者耦合隐式解算器时。显式时间步形式只能用在耦合显式解算器中。
- 不可压流动。显式时间步不能用于计算时间精度不可压流动（即：除了理想气体的气体定律）。在每一个时间步内，不可压解必须迭代直至收敛。
- 收敛加速。FAS 多重网格和残差光滑不能用于显式时间步进，这是因为它们破坏了解算器的时间精度。

时间相关问题的用户输入

要解决时间相关问题，请遵循下面的步骤：

1. 在解面板中激活非定常选项（下图），并指定所需要的非定常形式。菜单：Define/Models/Solver...。

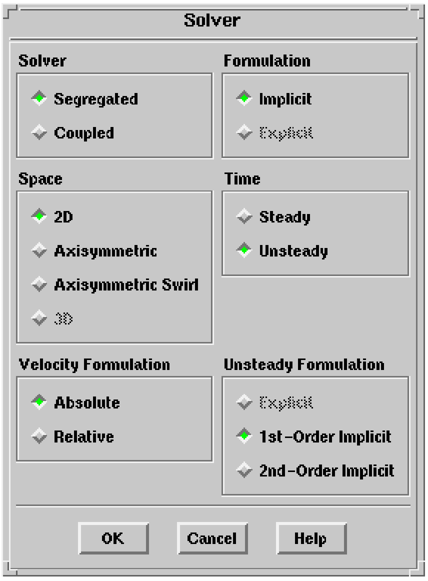


Figure 1: 非定常计算的解算器面板

一阶隐式格式对于大多数问题已经足够了。显式形式只有在面板顶部的解算器和形式选项下面选择耦合显式解算器时才可以使用。显式形式主要用于解决捕捉诸如激波之类的运动波的过渡问题。详细内容可以参阅时间离散一节。

2. 定义所有相关模型和边界条件。注意：任何用自定义函数指定的任何边界条件可以在时间中改变。详细内容清参阅 UDF 一章。
3. 如果你使用分离解算器，在解控制面板中的离散选项下选择 PISO 作为压力速度耦合格式。菜单：Solve/Controls/Solution...。

   一般说来，你不需要改变 PISO 参数的默认值。关于 PISO 的更多信息请参阅 PISO 一节。
4. （此步可选，但是在显式非定常形式中推荐使用）使用统计监视面板激活每一次迭代重当前时间的输出选项。菜单：Solve/Monitors/Statistic...。

   在统计列表中选择时间并打开打印选项，当 FLUENT 在每一步迭代中将残差打印到控制台窗口时，还会打印一栏当前的时间。
5. （此步可选）使用力监视面板或者曲面监视面板来监视（和/或保存到一个文件）随时间变化各力的系数值或者在曲面上随时间变化的变量或者函数的平均值、质量平均、积分或者流量。详细内容可以参阅监视解的收敛性一节。
6. 使用解初始化面板设定初始条件（在时间 t=0 时）。菜单：Solve/Initialize/Initialize...。

你也可以读入一个定常数据文件作为初始条件设定。菜单：File/Read/Data...。

7. （此步可选）在解的过程中使用自动保存功能来指定需要保存文件的名字以及 case 文件和 data 文件的保存频率。菜单：File/Write/Autosave...。

   关于该功能的详细使用可以参阅，case 和 data 文件的自动保存一节。

   你还可能希望用监视命令面板来请求其它命令的自动保存（如：显示等值线图并自动将它保存到硬拷贝文件）具体方法可以参阅在计算中执行命令一节。
8. 设定时间相关解参数并计算出一个解。下面分别是隐式和显式非定常形式的介绍：
   - 如果你使用一阶或者二阶隐式形式，你需要在迭代面板（下图）中设定时间相关解参数并对所需要的时间步来计算流动解。菜单：Solve/Iterate...。

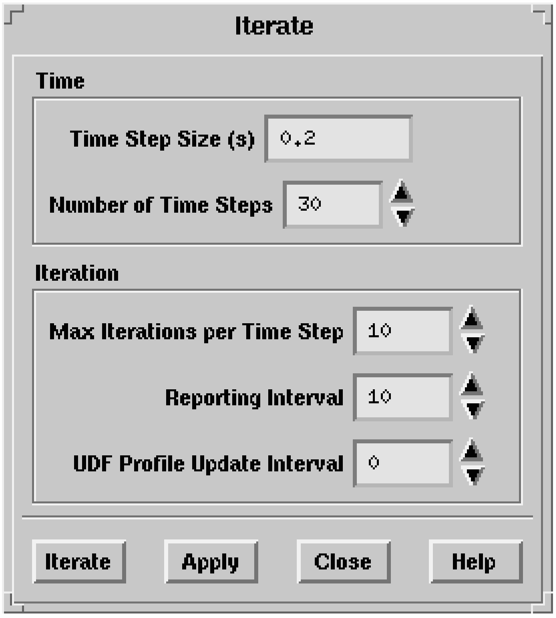


Figure 2: 隐式非定常计算的迭代面板

下面是隐式非定常格式的解参数：

- 每一个时间步的最大迭代次数：当 FLUENT 使用隐式各式解时间相关方程时，在每一个时间步都要进行必要的迭代。这个参数设定了每一个时间步内的最大迭代次数。如果在最大迭代次数之前已经满足了收敛判据，就会进行下一个时间步的解算。
- 时间步的大小：时间步的大小就是 D t 的大小。因为 FLUENT 用全隐格式，所以不存在用来确定 D t 的稳定性判据。但是为了正确模拟瞬时现象，有必要将 D t 设定比所模拟的系统最小时间常数小一个量级。判断 D t 选择的一个好方法就是观察每一个时间步中达到收敛 FLUENT 所需要的迭代次数。每一个时间步的理想迭代次数是 10—20。如果 FLUENT 需要更多迭代次数才会收敛就说明时间步太大了。如果 FLUENT 在每个时间步中只需要很少的迭代次数，就可以增加 D t。时间相关问题最常见的就是突然启动然后很快衰退。因此最好在前 5-10 个时间步中选择较小的 D t，然后在计算过程中逐渐增加 D t。

对于时间周期性计算，你需要在周期性时间尺度的基础上来选择时间步长。例如：对于转子/定子模型，你可能需要在每一个叶片通过的时间间隔中选取 20 个时间步。对于涡的脱落，你需要在每个周期选取 20 个时间步。

在计算过程中，FLUENT 会在每一个时间步结束时打印当前的时间。

- 如果选择显式非定常形式，你需要遵照下面的程序：
  1. 在解控制面板中选取默认的解算器参数设定（即：没有多重网格，没有残差光滑，Courant 数为 1）。菜单：Solve/Controls/Solution...。如果你曾经修改了默认的解算器参数，你可以点击默认按钮回到原来的默认设定。
  2. 对所需的迭代次数计算流动解。菜单：Solve/Iterate...。

一定要记住，对于显式非定常形式，每一个迭代就是一个时间步。当 FLUENT 将残差打印到控制台窗口时，同时也会包括一栏当前时间（如果在上面第 4 步作了如此请求的话）。

9. 如果需要的话，请保存最后的数据文件和 case 文件（如果该文件被修改了），从而保证以后还可以继续非定常计算。菜单：File/Write/Data...。

时间相关问题的后处理

时间相关数据的后处理和定常状态数据的后处理相似，我们可以使用图形和文字命令。你可以读入计算中任何点处手动或自动保存的数据文件来恢复任何所存储的时间步中的数据。菜单：File/Read/Data...。

FLUENT 会用当前数据设定的时间值标记任何图形和文字报告。

如果你将力或曲面监视器的数据保存到文件（时间相关问题的用户输入中的第五步），你可以将这些文件读入并画出相关图形来查看监视量的历史纪录。下图是以该方法产生的一个例子：

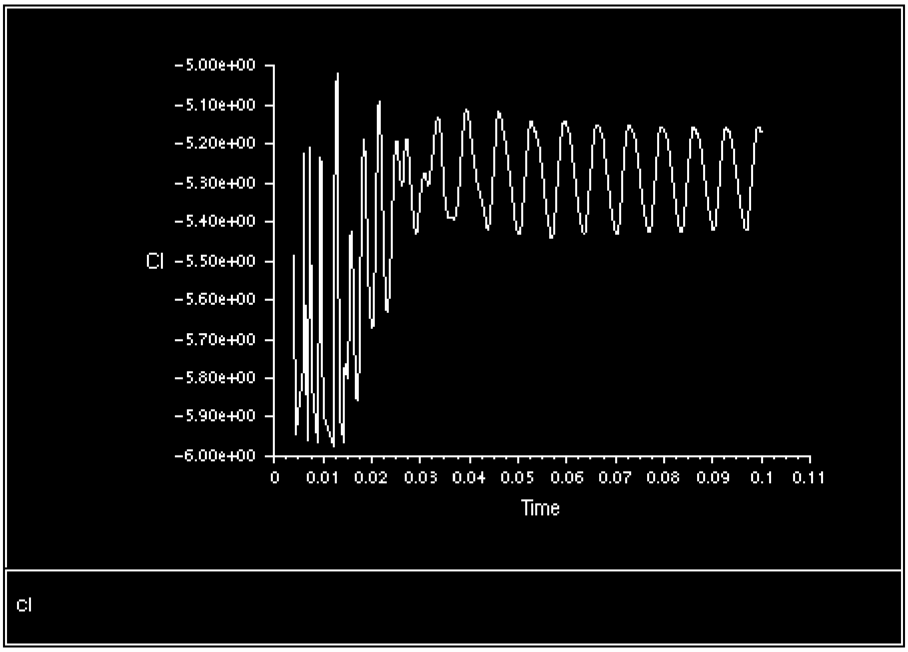


Figure 1: 时间周期解的升力系数图

自定义标量输运模拟

FLUENT 可以解决任意的，自定义标量（UDS）的输运方程，解决办法和解其它标量如组分质量分数的输运方程一样。在某一燃烧应用或者等离子体放大曲面反应模型中可能会需要其它的标量输运方程。例如，自定义标量可以用于实现磁流体力学（MHD）模型，来解决磁场中流体传导的流动问题。在 MHD 中，传导流体的流动诱发磁场，该磁场就应该用自定义标量来解。磁场产生了对流动的阻力，这个阻力是用自定义源项来模拟的（见自定义源项一节）。

对于任意标量 f_k，FLUENT 根据计算对流流量所使用的方法来解决下面三个方程的某一方程：

- 如果对流流量将不被计算，FLUENT 解下面的方程：

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i}\right) = S_{\phi_k}, k = 1, \ldots, N$$

其中 G_k 和 S_f_k 分别是你所提供的 N-标量方程的每一个方程补充的扩散系数和源项。

- 如果对流流量用质量流速计算，FLUENT 解下面的方程：

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i}\right) = S_{\phi_k}, k = 1,\dots,N$$

- 也可能指定一个用于计算对流流量的自定义函数。此时，FLUENT 解下面的方程：

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(F_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i}\right) = S_{\phi_k}, k = 1,\dots,N$$

其中 F_i 是自定义流量。

在 FLUENT 中，自定义标量只在流体单元而不在固体单元重中解。

定义、解决和后处理一个 UDS

下面概述了一下定义、解算和后处理自定义标量的步骤：

1. 在自定义标量面板（下图）中指定标量的数目。菜单：Define/Models/User-Defined Scalars...。

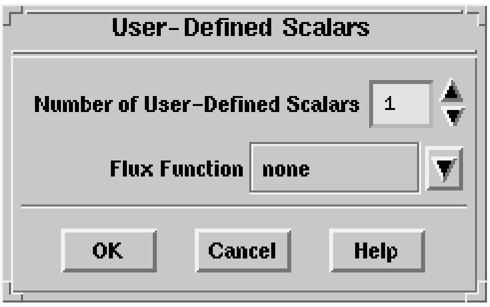


Figure 1: 自定义标量面板

2. 指定流量函数为无、质量流速或者自定义函数（已定义的自定义函数的名字会出现在流量函数列表中）。流量函数确定了对流流量如何计算，它确定了 FLUENT 处理 UDS 的方程。选择无、质量流速或者自定义函数，FLUENT 会分别解自定义标量输运模拟的方程 1，自定义标量输运模拟的方程 3 和自定义标量输运模拟的方程 5

   注意：对于所有的 UDS 你需要指定一个流量函数。如果你有多个 UDS，它们都会以同一种方式计算对流流量。如果你选择自定义函数，所有的 UDS 都必须包括流量函数。
3. 对于所有壁面，质量入流和质量出流边界，你需要为 UDS 指定边界条件。你可以为每一个标量定义一个指定值或指定的流量。菜单：Define/Boundary Conditions...。
   1. 在自定义标量边界条件（例如下图）中标量后面的下拉列表中选择指定流量或者指定值。

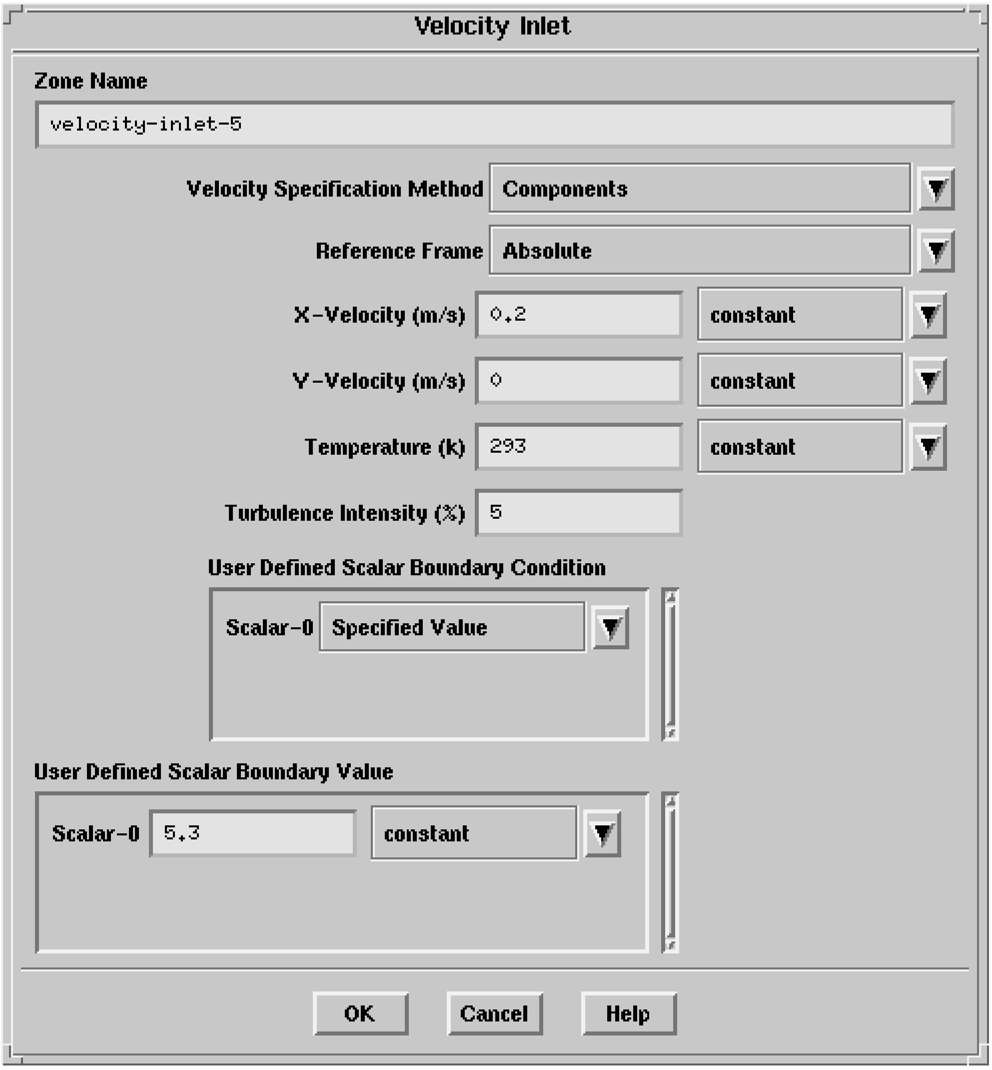


Figure 2: 自定义标量输入的速度入口面板

2. 在自定义标量边界值中输入常值或者为每一个标量选择自定义函数。如果选择指定流量，你所输入的就是边界处的流量值，如果你选择指定值，你所输入的就是边界处标量自己的值。

4. 如果你想在 UDS 方程中包含源项，请在流体面板中激活源项选项，并设定标量的源项为常值或者自定义函数（如下图）。如果指定的源项是自定义函数，你的函数必须计算源项 S 及其导数 ds/df 。菜单：Define/Boundary Conditions...。

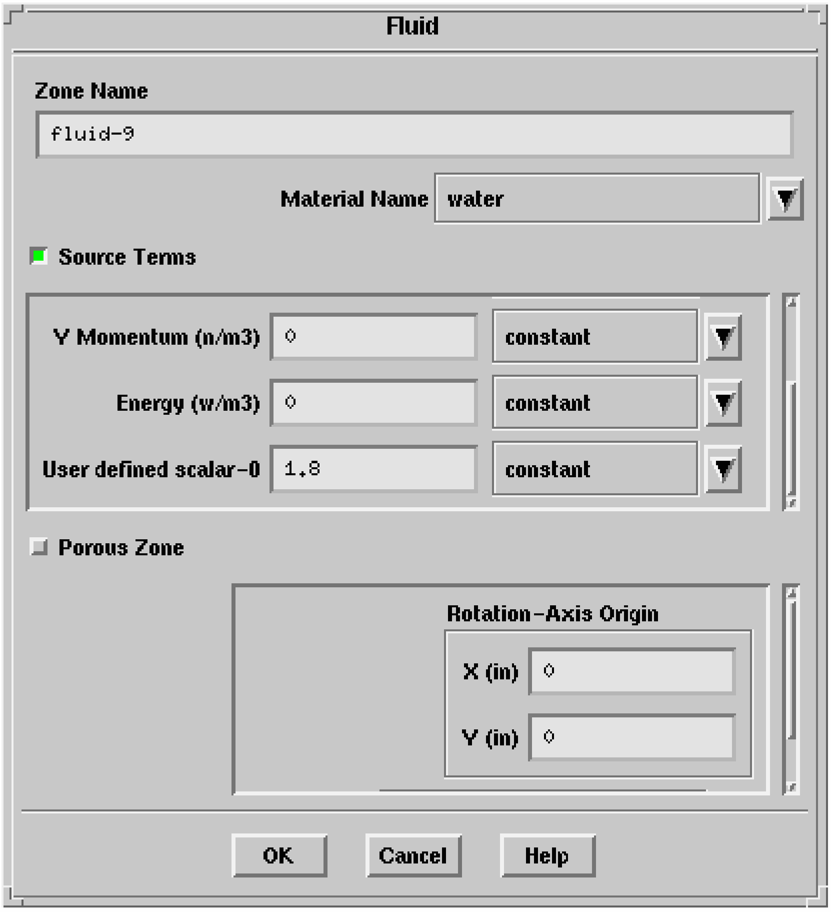


Figure 3:自定义标量源项的流体面板输入

5. 设定解参数，指定每一个 UDS（如你为所有其它标量输运方程所做的定义）的初值，并计算出一个解。
6. 使用后处理工具检查结果。在每一个后处理面板中，流场变量列表会包括自定义标量类别，这个类别包括了每一个 UDS 的值和扩散系数（自定义标量输运模拟中方程 1，自定义标量输运模拟方程 3 或者自定义标量输运模拟的方程 5 的 G_k：
   - 标量 n
   - 标量 n 的扩散系数

第九章 可动区域中流动问题的建模

前言

首先感谢赵大侠的帮助与支持。本人是fluent的初学者，翻译的过程也是学习的过程，因此译文中有很多不妥之处在所难免，非常欢迎读者更正，并与我交流。本人信箱rxdhjd@163.net或rxdhgd@163.com。

在运动参考系中的流动问题求解需要使用可动单元体。单元体的运动可以由用来依附单元体的参考坐标系的运动来解释。由此，很多包含运动部件的问题可以在 fluent 中得到解决。

9.1 概述

这一强大的特性可以求解计算区域或者部分计算区域是运动时的流动问题。包括以下几个方面：

- 单一旋转系中的流动
- 多旋转或（和）变动（translating）参考坐标系中的流动

单一旋转系可以用于涡轮机械，搅拌槽，以及相关装置中流动的建模．在这种情况下，因为转子或者叶轮周期性的掠过求解域，相对惯性参考系来讲，流动是不稳定的。然而，在不考虑静止部件的情况下，取于旋转部件一起运动的一个计算域，那么相对这个旋转参考系（非惯性系）来讲，流动就是稳定的了，这样就简化了问题的分析。

但是如果除了旋转部件，静止部件也要考虑的话，就不能用上述办法将问题简化。比如在涡轮机械中的叶轮和转子靠的很近（这样转子和定子之间的相互作用就变得重要了）。Fluent 提供了以下三种解决的办法：

- 多参考系模型（MRF）
- 混合平面模型
- 滑动网格模型

前两种模型均假设流动是稳定的，转子－定子或叶轮－轮盖的作用效果是近似的平均这两种模型可用于转子定子之间的只有微弱的相互作用，或只需要求系统的近似解的场合。相反，滑动网格假定流动是不稳定的，因此可以真实的模拟转子定子之间的相互作用。显然滑动网格模型可用于转子和定子之间有强烈的相互作用和要求对系统进行精确的仿真的场合，但是值得注意的是，滑动网格模型使用非稳态的数值求解，计算上的要求就比前两种模型要苛刻的多。

9.2 旋转参考坐标系中的流动

9.2.1 概述

通常 FLUENT 中的模型都是建立在惯性参考坐标系中（例如无加速度坐标系统），但是，FLUNET 也可以在具有加速度的参考坐标系中建立流动模型。这样，用于描述流动的运动方程中就包含了加速度参考坐标系统。旋转设备中的流动问题工程中常见一个有关加速度参考坐标系的例子。很多这样的流动问题可以通过建立一个于与旋转设备一起运动的坐标系来建模，从而使得在径向的加速度为常数。这一类的旋转问题在 FLUENT 中就可以用旋转参考坐标系来处理。图 9.2.1 例举了一个旋转标系中的流动问题，阐明了坐标系转换过程中动静部分的变化。

旋转坐标系应用

图 9.2.2 例举了几个可以应用旋转坐标系来建模的流动问题包括以下几个方面：

- 搅拌槽中的搅拌桨
- 涡轮机械的旋转叶片（如离心机叶轮，轴流风扇等）
- 旋转通道中的流动（如冷却管道，二次风流动环路，旋转设备中的圆盘空穴等）

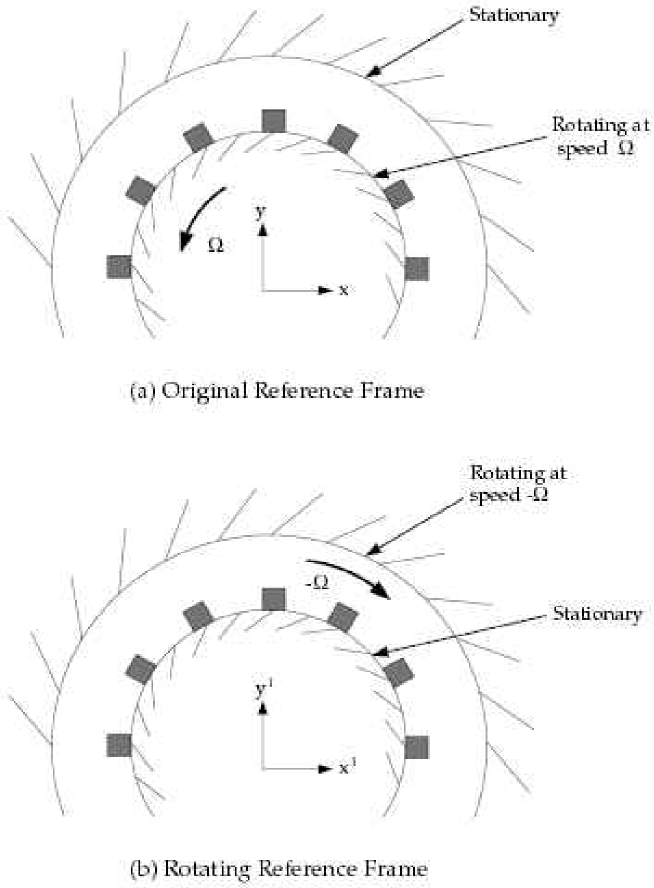


Figure 9.2.1: Transforming Coordinates to a Rotating Reference Frame

当这些问题被定义在旋转坐标系中时，由于旋转边界与参考系以相同的速度运动，因此旋转边界相对于旋转参考系是静止的。

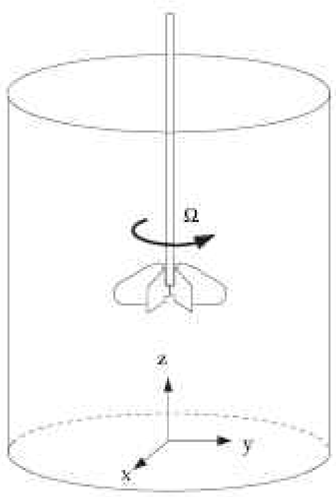
定子－转子相互作用模型的建立

9.1节中已经提到，转子－定子之间的相互作用问题不能简单的通过把坐标系转换成旋转坐标系来解决。在FLUENT中，转子－定子相互作用必须通过MRF法，混合平面法或滑动网格的方法来解决，这些方法分别在9.3，9.4，9.5节中详细阐述。

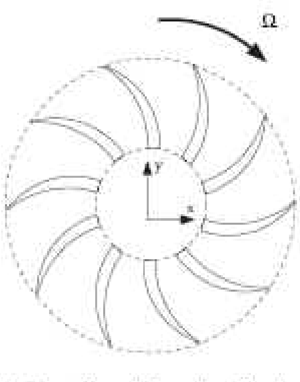
9.2.2旋转坐标系中的方程

流体的加速度作为一个附加项出现在旋转坐标系运动方程中的动量方程里，这时FLUENT允许将绝对速度$\vec{v}$或相对速度$\vec{v}_r$各自作为独立参数，两种速度之间的关系如下：

$$\vec{v}_r = \vec{v} - (\vec{\Omega} \times \vec{r})$$

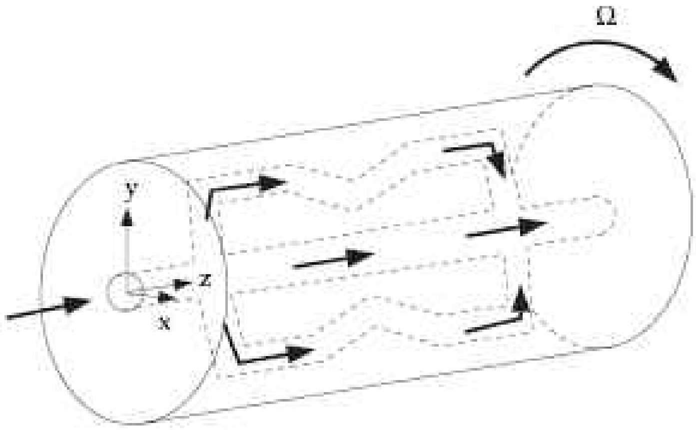


(a) Rotating Impeller in a Mixing Tank

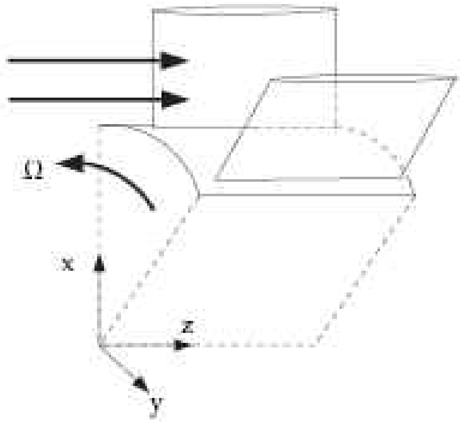


(b) Centrifugal Impeller Blades

Figure 9.2.2: Applications That Can Be Modeled by FLUENT in a Rotating Reference Frame



(c) Cooling Passages in a Spinning Rotor



(d) Axial Impeller Blades

Figure 9.2.2: Applications That Can Be Modeled by FLUENT in a Rotating Reference Frame

其中，$\bar{\Omega}$指角速度向量（即旋转坐标系的角速度）$\bar{r}$是旋转坐标系中的位置向量。惯性坐标系中的动量方程左侧如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v})$$

旋转坐标系中的动量方程左侧如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}_r\vec{v}) + \rho(\vec{\Omega} \times \vec{v})$$

根据$\vec{v}$与$\vec{v}_r$的关系代入上式，消去$\vec{v}$得

其中 $2\vec{\Omega}\times\vec{v}_r+\vec{\Omega}\times\vec{\Omega}\times\vec{r}$, 为哥氏力。需要注意的是 FLUENT 忽略了 $\rho\frac{\partial\vec{\Omega}}{\partial t}\times\vec{r}$ 项，因此不能用动量方程的相对速度表达式准确的模拟随时间变化的角速度。

旋转坐标系中的质量守恒方程或者叫连续性方程，不论是使用相对速度，还是使用绝对速度，都可表示如下：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{v}_r)=S_m \tag{9.2-5}$$

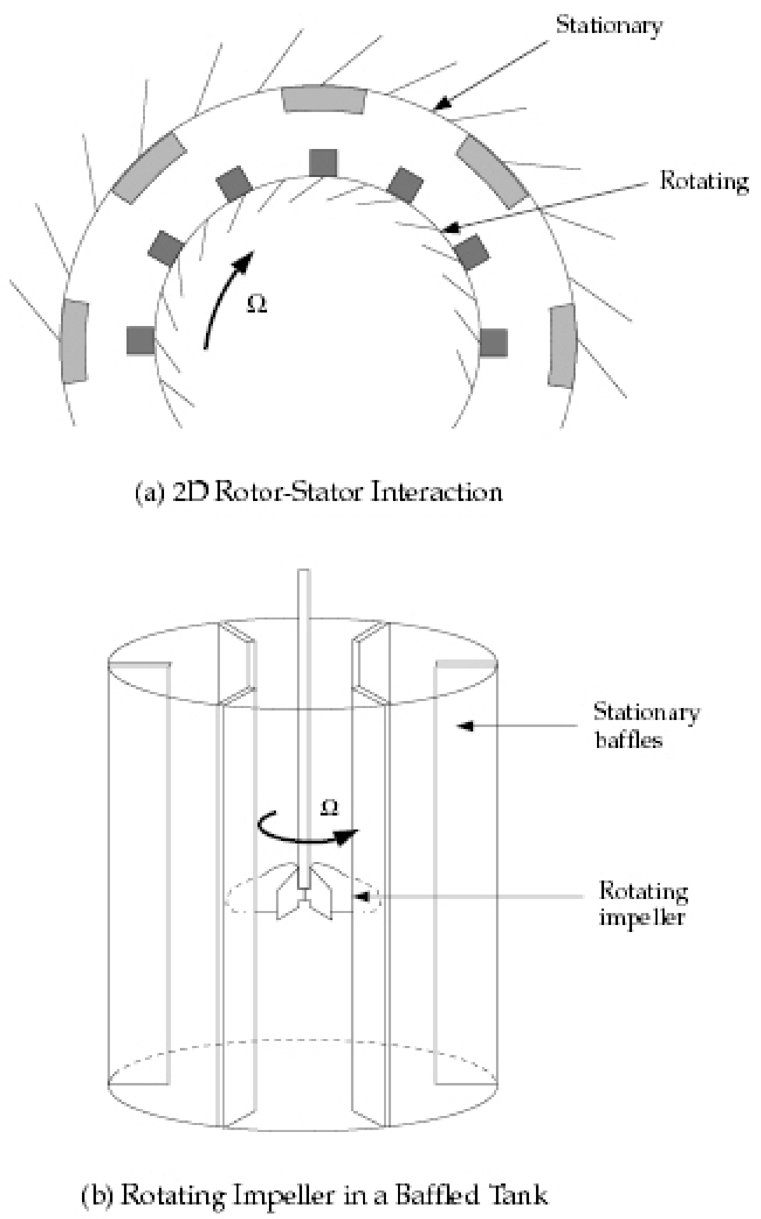


Figure 9.2.3: Problems That Require MRF, Mixing Plane, or Sliding Meshes

9.2.3 单旋转坐标系下网格的建立

当建立问题使用旋转坐标系时必须牢记注意以下约束条件：

- 2 维问题，旋转轴必须平行于 Z 轴
- 2 维轴对称性问题，旋转轴必须是 X 轴
- 3 维问题，对于旋转单元体，你应该在头脑中先指定一个旋转轴来建立网格，为了方便通常选取 x 轴，y 轴或 z 轴做为旋转轴，但是 FLUENT 能过提供绝对旋转坐标轴.

9.2.4 导入网格后的建模步骤

1.选择 **Solver** 面板中的 **Velocity Formulation:** 是用绝对速度还是相对速度(细节请看 9.2.5 节)

Define ⟶ Models ⟶ Solver...

2．为计算区域中的单元体设定旋转参考坐标系的角速度和旋转轴.

Define ⟶ Boundary Conditions...

(a) 在 **Fluid** 或 **Solid** 面板中通过定义旋转坐标轴的原点和方向来确定坐标轴。

(b) 在 **Fluid** 或 **Solid** 面板中的 **Motion Type** 下拉菜单中选择 **Moving Reference Frame** 项然后设定 R**otational Velocity** 下的 **Speed**

参数输入的详细情况见 6.17.1 节和 6.18.1 节。

3.定义壁面的速度边界条件，速度可以定义为绝对加速度．也可以定义为相对与移动参考系的速度。如果壁面随着旋转参考系运动（因此相对旋转参考系是静止的）这时将其角速度设为零会比较方便。同理，非旋转坐标参考坐标系中的静止壁面在绝对参考坐标系中的速度应设为零。这样设置壁面速度是为了避免在流体计算域的旋转速度发生变化时，修改速度参数。

下给定相对速度的的一个例子：如果叶片定义为 wall－３，叶片半径范围内的流体区域定义为 fluid－５，这时你要定义 fluid－５的角速度和旋转轴然后定义 wall－３的相对速度为零．如果以后要模拟一个在另一个角速度下运行的叶片，那么你只需要改变流体区域的角速度，而不需要修改壁面的速度条件.

参数详细设置请看 6.13.1 节。

参数详细设置请看 6.13.1 节。

4.定义速度入口（velocity inlets）的速度和压入口（pressure inlets）的流动方向和全压。对于速度进口，既可以定义绝对速度也可以相对于邻近区域的速度。对压力进口的流动方向和全压取相对值还是绝对值，取决于你在第一步中对于速度表达式的选择，详情请看 9.2.5 节（如果使用的是耦合求解规则，参数的描述总是相对于绝对参考系的。

参数详细设置请看 6.3.1 和 6.4.1 节。

9.2.5 相对速度表达式和绝对速度表达式的选择

（译者注：这里的相对速度表达式和绝对速度表达式应该指的是动量方程是用相对速度表示还是用绝对速度表示。欢迎读者指正）

绝对速度表达式适用于求解域的流体大部分是静止的(如大空间中的风机)。相对速度表达式适用于求解域的流体大部分是旋转的。比如混合器中有一个搅拌桨。对于大多数应用，两者都可以。

！当使用耦合求解法则时，总是选择绝对速度，对于耦合求解器不能用相对

速度。

对于速度入口和壁面，不管计算中选择的是相对速度表达式还是绝对速度表达式，你可以任意指定速度为相对的或是绝对的。

在旋转参考坐标系中对于压力边界条件有如下限制：

在压力入口上的总压和流动方向,假如速度表达式中的速度是绝对的，你应该定义成绝对的。如果速度表达式中的速度是相对的，总压和流动方向应该相对与旋转参考系。

压力出口，静压的定义与参考系无关系。当压力出口有逆流时，静压就是总压。在绝对参考系中如果用绝对速度，那么静压就是总压，同样在相对坐标系中如果使用相对速度，认为静压就是总压。对于逆流的流向，如果是绝对速度表达式，那么绝对速度垂直于压力出口，若使用相对速度表达式，则相对速度垂直于压力出口。

9.2.6 旋转参考坐标系的求解策略。

求解旋转参考坐标系中流动问题遇到的困难与 8.4.5 节中求解旋涡或旋转流动遇到的困难相似，主要是当旋转项的影响很大时动量方程的高度耦合。高速的旋转会产生一个很大的径向压力梯度，从而推动流体向轴向和径向流动，因此在流场中形成旋涡或旋度（rotation）的分布。这种耦合会导致求解过程不稳定，这就需要特殊的求解技巧，如下：

- （适用于解耦求解器）转换参考系，随相应的参考改变速度表达式，从而求解速度。
- （适用于解耦求解器）使用 PRESTO！方案（在 **Solution Controls** 面板中激活），这种方案非常适合于旋转流动中的大压力梯度。
- （适用于解耦求解器）减小速度的低松弛因子，将其设为 0.3～0.5 或更低。
- 用一个较低旋转速度开始计算，然后逐渐增加，最终获得合理的结果。

有关求解参数的变化过程请看第 22 章。

通过逐渐增加旋转速度来改善求解的稳定性

因为参考坐标系的旋转和边界条件的定义旋转会带给流动复杂的力，随着速度的增加，求解将会变得不稳定。因此，你可以用以比较小的速度开始求解，然后慢慢的增加速度，从而达到要求的水平。步骤如下：

1）给边界条件设定一个较小的旋转速度，同时给参考坐标系一个较小的角速度，可以使正常水平的 10%

2）在上述条件下求解。

3）保存求解数据

4）改变边界条件速度和参考系的角速度，可以将速度提高一倍。

5）以前面的求解值作为这一步的初始值进行求解，并保存结果。

6）重复 4 和 5 步骤最终达到所希望的操作条件。

9.2.7 单旋转参考坐标系的后处理

当使用旋转参考坐标系模型求解问题时，你可以对绝对速度或相对速度进行绘图。对于任何速度参数（如 Velocity Magnitude and Mach Number 速率和马赫数），相应的相对量都可用（如 Relative Velicity Magnitude and Relative Mach Number 相对速率和相对马赫数）. 这些参数都包括在后处理面板中的变量选择下拉菜单中的 Velocity...类中. 对于总压总温以及任意依赖与相对参考坐标系的具有动力学属性的其他参数，都可以对其相对值进行后处理。

当对速度向量进行绘图时，你可以选择在绝对坐标系中画（默认），也可以在向量下拉菜单中选择相对速度来画相对于在参考区域的平移 / 旋转速度的相对速度。

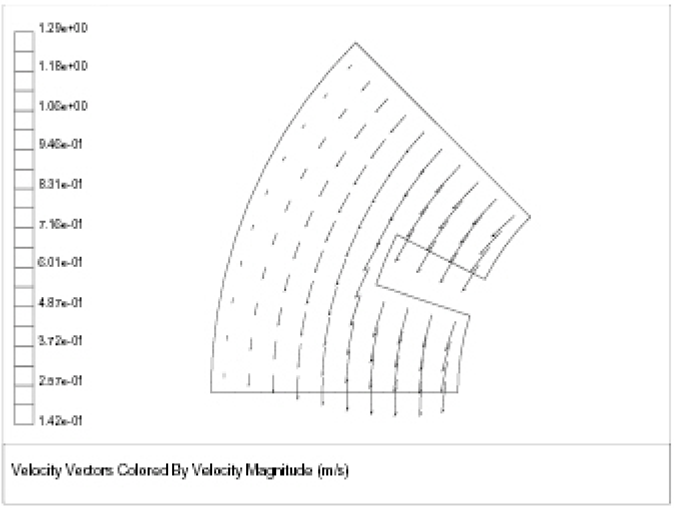


Figure 9.2.4: Absolute Velocity Vectors

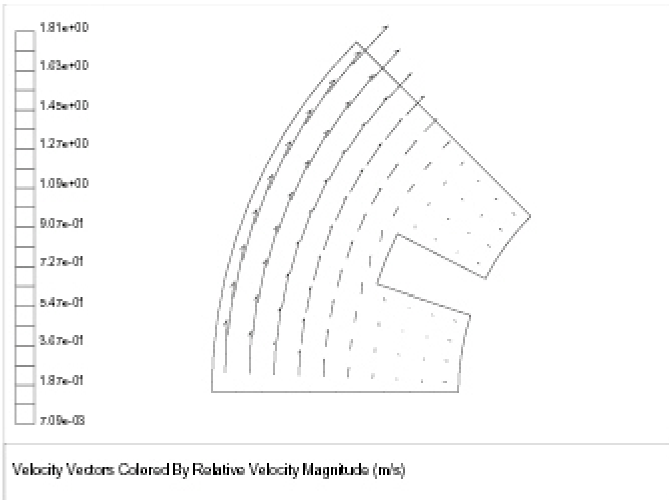


Figure 9.2.5: Relative Velocity Vectors

9.3 多参考系模型（MRF）

9.3.1 概述

9.1 节提到 FLUENT 提供了以三种关于静止和移动区域并存问题的模型建立办法：

- 多参考系模型（MRF）
- 混合平面模型
- 滑动网格模型

MRF 模型是三者中最简单的。它是不同旋转或移动速度的每个单元体的稳态近似。当边界上流动区域几乎是一致时（均匀混合），这个方法比较适宜。

显然多参考系模型方法是近似的，在很多时均流的应用场合它提供了合理的模型。例如，转子和定子之间交互作用相对较弱的涡轮机可以使用 MRF 模型。叶轮片交互作用相对较弱，无大范围瞬态影响的混合槽可以使用 MRF 模型。一般来说，由于转子和定子之间交互作用相对较弱的的瞬态问题可选择 MRF 模型。

另一个 MRF 模型计算流场的潜在用法可以使用瞬态滑动网格模型的初始条件。这就消除了初始计算。然而，在需要精确模拟强烈作用的叶轮片的瞬态模型时，不能使用 MRF 模型。这种情况下应该使用滑动网格模型（参考 9.5 节）。

例子

在单搅拌桨的混合槽中定义一个包括搅拌桨及其周围流体的旋转参考系和一个搅拌桨区域以外的流体的静止坐标系。外形如图 9.3.1 所示（虚线表示两参考系的界面）。假定两参考系的界面是稳态流动。也就是对于每个参考系的界面速度必须相同（绝对速度）。网格没有移动。

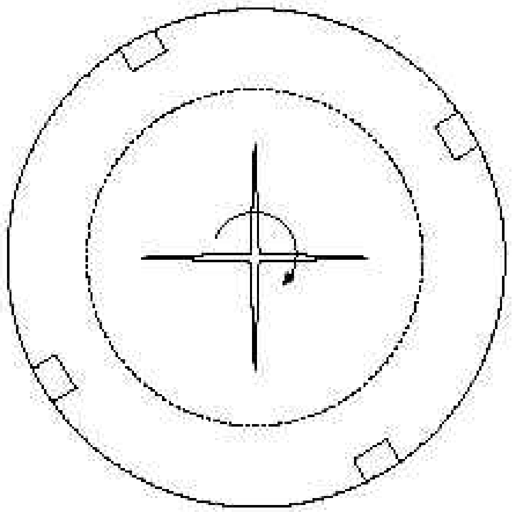


Figure 9.3.1: Geometry with One Rotating Impeller

也可以对多于一个旋转参考系的问题进行模型。图 9.3.2 显示了包括两个并排的搅拌桨的几何体。这个问题应用三个参考系模型：两个搅拌桨区域以外的静止坐标系和建立在两个搅拌桨上的独立的旋转参考系。（如前，虚线表示参考系之间的界面。）

约束条件

应用 MRF 模型的以下约束条件：

- MRF 模型不推荐使用 realizable　k－ε 模型

- 分开移动区域和邻近区域的边界必须定向，这样使得参考垂直于边界的速度分量为零。如图 9.3.1 所示例子，这要求虚线的边界是圆周（而不是矩形或其他形状）。对于平移参考系，移动区域的边界必须平行于平移速度。

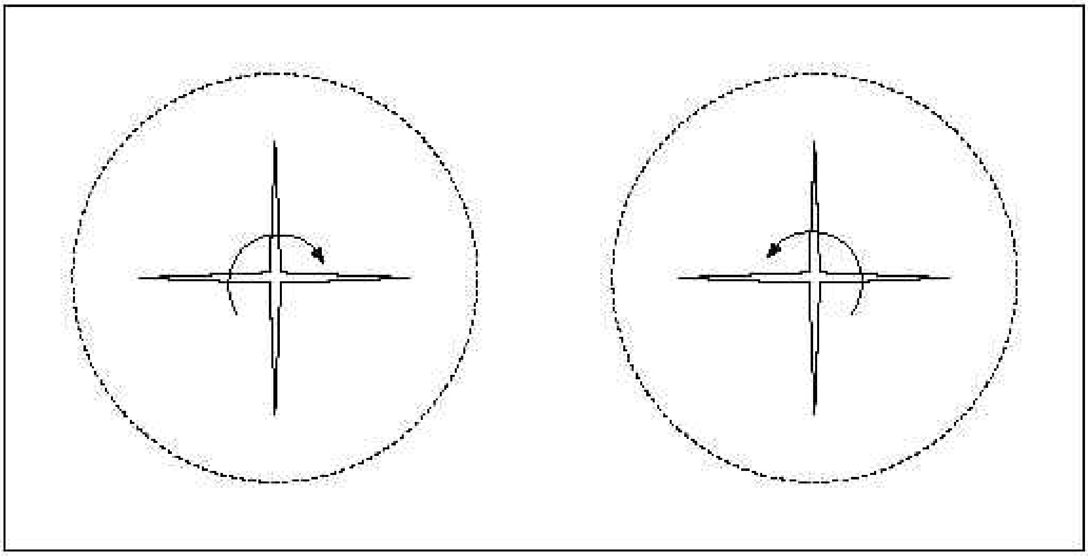


Figure 9.3.2: Geometry with Two Rotating Impellers

- 严格上讲， MRF 模型的使用只对于稳流有意义，然而，FLUENT 允许使用 MRF 模型解决非稳态流动。这种情况下，在控制输运方程增加了非稳态项（见 22.2.8 节）。你应该细致考虑这样做是否能对你的问题产生有意义的结论，因为对于非稳态流动，滑动网格计算比 MRF 计算产生更有意义的结论。
- FLUENT 画的质点轨迹和路线使用的是相对单元运动的速度。对于无质量质点，基于相对速度的流线的路径是有意义的。然而，对于有质量的质点，显示质点轨迹是无意义的。同样地，耦合离散相计算是无意义的。

  MRF 模型的质点跟踪和耦合离散相计算的另一替代方法是基于绝对速度而不是相对速度的质点跟踪。作这样改变，用 **define/models/dpm/tracking/track-in-absolute-frame** 文本命令。注意到其于绝对速度的质点跟踪会得到错误的粒子与壁面的相互作用。对质点入射速度（在 **Set Injection Properties** 面板设置）的定义要相对于质点跟踪所使用的的参考系。缺省设置的入射速度是相对于局部参考系。如果设置 **track-in-absolute-frame** 选项，这是入射速度是相对于绝对参考系。
  - 在 MRF 使用相对速度公式也不能精确模拟轴对称涡旋。因为当前的执行没有应用方程 9.3-3 的转换到涡旋速度偏导。
  - 假设平移速度和旋转速度是常数（ω，υ_t 不随时间变化）。

9.3.2MRF 公式

MRF 公式依赖所使用的速度公式

相对速度公式

在 FLUENT 多参考系特征的执行，计算区域分为子域，每个子域相对于实

验（惯性）系的可能是旋转或平移的。每个子域的控制方程是关于子域参考系而写的。因此，静止或平移子域的流动是由 8.2 节的方程控制，而旋转子域的流动是由 9.2.2 节的方程控制。

在两子域间的边界，子域的控制方程的扩散项和其他项需要邻近子域的速度值。FLUENT 强制使用绝对速度 $\vec{v}$ 的连续性，向所考虑的子域提供相邻区域正确的值.（这个方法不同于 9.4 节描述的混合平面方法，它是使用了圆周平均技术。）

使用相对速度公式，每个子域的速度相对于子域的运动计算。速度和速度梯度从移动参考系如下描述的转换到绝对惯性系。

计算区域旋转轴的初始位置的位置向量定义为：

$$\vec{r} = \vec{x} - \vec{x}_0 \qquad (9.3-1)$$

这里的 $\vec{x}$ 是笛卡儿坐标的位置向量，$\vec{x}_0$ 是计算区域旋转轴的初始位置，如图 9.3.3 所示。

移动参考系的相对速度可以通过以下方程转换为绝对（静止）参考系的值：

$$\vec{v} = \vec{v}_r + (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{v}_t \qquad (9.3-2)$$

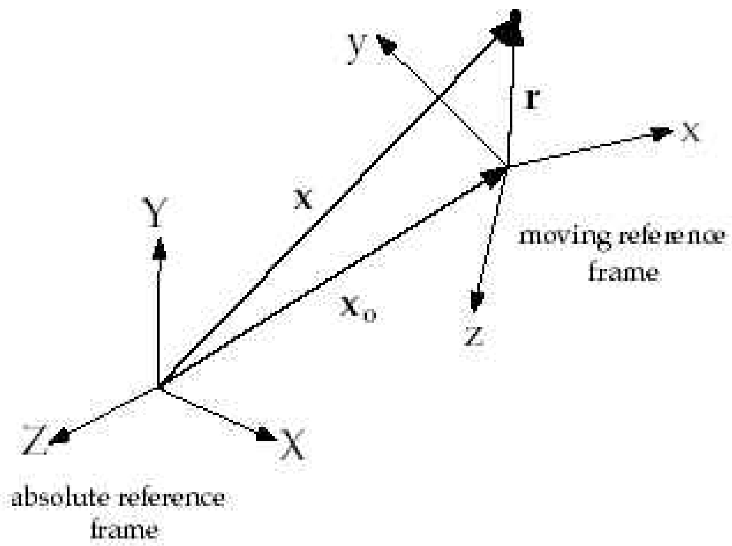


Figure 9.3.3: Coordinate System for Relative Velocity

这里的速度 $\vec{v}$ 是绝对惯性参考系的速度，$\vec{v}_r$ 是相对非惯性参考系的速度值，$\vec{v}_t$ 是非惯性参考系的平移速度.

根据定义的相对速度，绝对速度向量的梯度以下式子给予;

$$\nabla \vec{v} = \nabla \vec{v}_r + \nabla(\vec{\omega} \times \vec{r}) \qquad (9.3-3)$$

绝对速度公式

使用绝对速度公式时，每个子域的控制方程是关于子域的参考系来建立，但

是速度是以绝对速度存储。因此在两子域之间转换。

9.3.3MRF 的网格建立

有两种网格建立方法。选择合适于你模型的方法，注意 9.3.1 节的约束条件。

- 如果不同参考系两区域之间的边界是保角角的（例如，网格结点在两区域交界处边界是一样的），可以简单如通常一样建立网格，所有的单元区域包括在同一网格文件里。不同单元区域存在不同参考系的模型的每一区域部分。在不同参考系之间的边界使用内部区域。
- 如果不同参考系两区域之间的边界是非保角的（例如，网格结点在两区域交界处边界是不一样的），遵循 5.4.3 节描述的非保角网格建立过程。

9.3.4MRF 问题建立

当你想对关于 MRF 问题建立模型，需要完成以下模型输入。（只有特别相关 MRF 问题建立的步骤列在这里。还需要建立通常的剩余步骤。）

！列在 9.2.3 节的旋转参考系的网格建立约束也适用于 MRF。

1.选择 **Solver** 面板下 **Velocity Formulation: Absolute** 或 **Relative**。（参见 9.2.5 节具体细节）

Define → Models → Solver...

（注意到这个步骤是不相关的，假如使用某一耦合运算法则；这些运算法则总是用于绝对速度公式。）

2.对于区域内每个单元体，确定它的转移速度或角速度（Ω）和旋转轴。

（a）如果区域是旋转的，或者你打算确定区域入口成分的圆柱速度或流动方向，你需要定义旋转轴。在 **Fluid** 面板或 **Solid** 面板，确定 **Rotation－Axis Origin** 和 **Rotation－Axis Direction**。

（b）同样在 **Fluid** 面板或 **Solid** 面板，在 **Motion Type** 下拉菜单选择 **Moving Reference Frame** 并且在 Rotation Velocity 设置 Speed 或者在扩展面板 **Translational Velocity** 部分设置 **X**，**Y**，**Z** 分量。

这些输入的细节见 6.17.1 节的流体区域和 6.18.1 节的固体区域。

3.定义壁面的速度边界条件，速度可以定义为绝对速度．也可以定义为相对于步骤 2 定义邻近区域的速度。

如果壁面随着旋转参考系运动（因此相对旋转参考系是静止的）这时将其角速度设为零会比较方便。同理，非旋转坐标参考坐标系中的静止壁面在绝对参考坐标系中的速度应设为零。这样设置壁面速度是为了避免在流体计算域的旋转速度发生变化时，修改速度参数。

下给定相对速度的的一个例子：如果叶片定义为 wall－３，叶片半径范围内的流体区域定义为 fluid－５，这时你要定义 fluid－５的角速度和旋转轴然后定义 wall－３的相对速度为零．如果以后要模拟一个在另一个角速度下运行的叶片，那么你只需要改变流体区域的角速度，而不需要修改壁面的速度条件．
参数详细设置请看 6.13.1 节。

4.定义速度入口（velocity inlets）的速度和压入口（pressure inlets）的流动方向和全压。对于速度进口，既可以定义绝对速度也可以相对于邻近区域的速度。对压力进口的流动方向和全压取相对值还是绝对值，取决于你在第一步中对于速度表达式的选择，详情请看 9.2.5 节（如果使用的是耦合求解规则，参数的描述总是相对于绝对参考系的。
参数详细设置请看 6.3.1 和 6.4.1 节。

9.3.6 多相参考系的的后处理

当使用多相参考系模型求解问题时，你可以对绝对速度或相对速度进行绘图。对于任何速度参数（如 Velocity Magnitude and Mach Number 速率和马赫数），相应的相对量都可用（如 Relative Velicity Magnitude and Relative Mach Number 相对速率和相对马赫数）．这些参数都包括在后处理面板中的变量选择下拉菜单中的 Velocity...类中．对于总压总温以及任意依赖与相对参考坐标系的具有动力学属性的其他参数，都可以对其相对值进行后处理。

当对速度向量进行绘图时，你可以选择在绝对坐标系中画（默认），也可以在向量下拉菜单中选择相对速度来画相对于在参考区域的平移／旋转速度的相对速度。

9.4 混合平面法

9.4.1 概述与其应用的限制

混合平面模型是 FLUENT 提供的除多参考系模型和滑动网格模型的以外的用于模拟流域有中一个或多个区域作相对运动的情况的一种可供选择的方法。

概述

如 9.3.1 所述，MRF 模型用于以不同速度运动的两个相邻的区域的边界上的流动情况是接近一致的情况。如果流动情况不一致，那么用 MRF 模型求解就没有意义。这时，可以用滑动网格模型，但是在很多情况下，用滑动网格模型也不实际。例如，在多机透平机械中，（　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　）而且滑动网格模型以非定常为基础，因此计算量比较大。在滑动网格模型不可行的情况下，用混合平面模型不失为一种有效的解决办法。

在混合平面法中，每个流域都看成是稳态的. 流域之间通过做为边界条件的混合平面上经过空间平均或者说是混合的数据来联系。通过混合就消除了流域通道之间由于周向变化而导致的不稳定（如尾流，激波，分流），从而得到稳态解。撇开混合平面模型内在的这种简化，它提供了了时均流场合理的近似。

限制

应用混合平面模型时要注意以下限制：

- 混合平面模必须使用绝对速度表达式，不能用相对速度表达式。
- 混合平面模型不能使用 LES 紊流模型。
- 混合平面模型中不能与物质的输运和燃烧模型一起使用。
- 混合平面模型中不能与通用多相模型（VOF，mixture 和 Eulerian）。

9.4.2 混合平面理论

转子和定子的范围

考虑图 9.4.1，9.4.2 所示的透平机械级。图 9.4.1 画了轴向机械的一个定半径平面，图 9.4.2 画了混流装置的一个定θ平面。以上两个图的级间都包含了两个流动区域：转子区域，以一定的角速度旋转，其后是定子区域，是静止的。定子和转子的顺序是任意的（即，转子可以处在定子的下游）

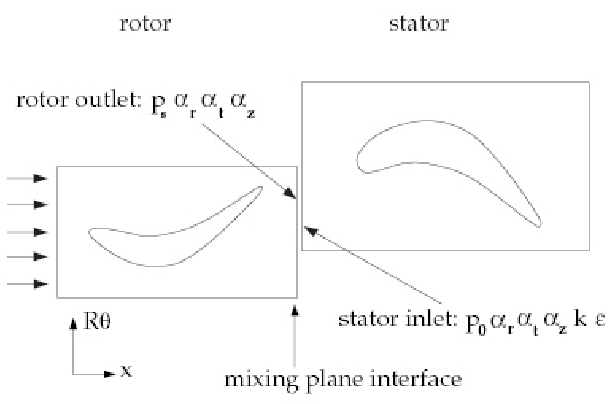


Figure 9.4.1: Axial Rotor-Stator Interaction (Schematic Illustrating the Mixing Plane Concept)

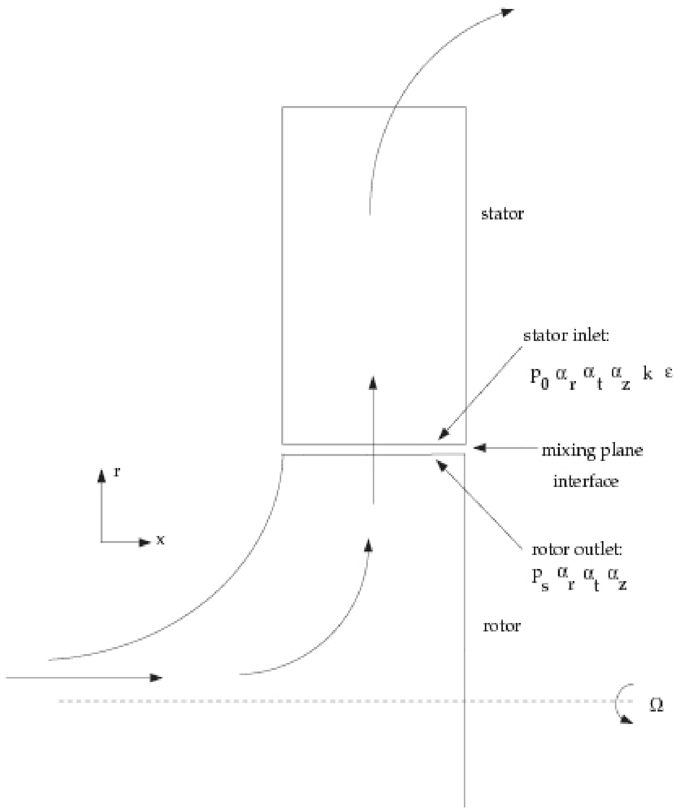


Figure 9.4.2: Radial Rotor-Stator Interaction (Schematic Illustrating the Mixing Plane Concept)

在数值模拟中，每个区域都有自己独立的网格。各个区域之间流动的信息通过混合平面模型中的中的混合平面界面来耦合（图 9.4.1 和 9.4.2 所示），如果有多个区域，每给区域之间都得通过这种方法来耦合；例如，四个叶片通道可以通过三个混合平面来耦合。

！转子和定子的网格不要求是保角的，即定子入口的网格节点不必和转子出口的网格匹配,另外网格的类型也可以不同（例如，定子是流面体网格，而转子是四面体网格）

混合平面的概念

为了了解混合平面概念，我们必须了解混合平面模型是怎么把流动区域当稳态问题来处理的。在指定的迭代间隔里，混合平面界面的流动数据是定子出口和转子入口边界数据周向平均值。FLUENT 使用面积－质量平均，通过做径向和轴向位置的周向平均，描述流体特性的信息就被定义了，这些信息（或者是径向坐标的函数，或者是轴向坐标的函数，具体根据于混合平面的方位来确定。）用来更新混合平面界面的边界条件。图 9.4.1 和图 9.4.2 所示的例子中在转子出口处计算全压（p_0）局部流动角的径向切向轴向的 cos 值（α_r α_t α_z），全温（T_o），紊流动能（k），紊流发散率（ε）用于更新定子的入口边界条件。同样在定子出口出计算静压（p_s）做为转子出口出的边界条件。

通过上述方式传递信息需要在混合平面界面处给出特定的边界条件类型。一对上游出口边界和下游入口边界称为“混合平面对”。为了建议混合平面对，必

须如下定义边界区域的类型：

upstream	downstream
pressure outlet	pressure inlet
pressure outlet	velocity inlet
pressure outlet	mass flow inlet

关于建立混合平面详细介绍请看 9.4.3 小节。

FLUENT 的混合平面运算规则：

1．更新定子和转子区域的流场求解结果

2．对定子入口和转子出口的边界流体特性求平均，获得用于更新边界条件的信息。

3．将获得的信息传递给定子入口和转子出口的边界条件

4．重复 1－3 步直到收敛

！需要注意为了防止结果的发散可以修改边界条件的低松弛。FLUENT 允许用户控制混合平面的低松弛因子。

质量守恒

需要注意的是如果混合平面对是由压力入口和压力出口组成，以上的运算法则不保证混合平面上严格的质量守恒，如果是由质流入口和压力出口组成，则 FLUENT 保证混合平面上严格的质量守恒。基本的技术包括计算上游区域（压力出口）然后调整质流入口的质量流量使其余上游的流量符合。每一步迭代都进行这样的调整，以保证整个计算过程中的质量流量严格守恒。

！注意：由于质量流量守恒，因此在混合平面处会出现全压的突升，但是这种突升与流场中其他地方压力的变化相比通常通常都是微不足道。

旋量（swirl）守恒

默认情况下，FLUENT 不保证旋量守恒。但对矩变换器，作用在部件上的转矩之和为零，这时的混合平面上的旋量守恒十分必要，因此在 FLUENT 中做为模型的一项列出。确保旋量的守恒很重要，否则混合平面的切向动量就会产生和下降。

考虑一个包含静止或旋转部件（例如，泵的叶片或涡流翼片）使用流体机械的动量矩方程，稳态形式如下：

$$T = \iint_S r v_\theta \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dS$$

T 是流体作用在部件上的扭矩，r 到旋转轴的径向距离，v_θ 是绝对切向速度，$\vec{v}$ 是绝对滞止速度，S 是边界曲面。（乘积 $r v_\theta$ 指的是旋量。）

对于周向周期领域，对于定义明确的入口和出口边界方程 9.4.1 变成

$$T = \iint_{\text{outlet}} r v_\theta \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dS + \iint_{\text{inlet}} r v_\theta \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dS$$

公式中的入口和出口指的是入口边界曲面和出口边面曲面。
现在考虑混合平面具有有限的 streamwise 厚度，把方程应用到这个区域且厚度趋向于零，则扭矩为零，方程变为

$$\iint_{\text{downstream}} r v_\theta \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dS = \iint_{\text{upstream}} r v_\theta \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dS \qquad (9.4\text{-}3)$$

公式中的 downstream 和 upstream 指的是混合平面界的上游和下游边。注意到方程 9.4－3 应用在整个混合平面界面（360 度）。

9.4.3 混合平面模型问题的建立

这一节讲述了建立混合平面模型所需要输入的参数。

1.在 SOLVER 面板中选择绝对速度表达式。

Define ⟶ Models ⟶ Solver...

２．给定计算区域中的每个单元区域的角动量和旋转轴。

Define ⟶ Boundary Conditions...

（ａ）如果区域是旋转的或打算给定区域入口圆周速度或流动方向，就需要定义旋转轴，在 Fluid 面板或 Solid 面板中，定义旋转轴起点和旋转轴方向

（ｂ）打开 Fluid 面板或 Solid 面板，在 Motion Type（运动类型）下拉菜单中选择 Moving Reference Frame（移动参考坐标系），然后在扩展开来面板中设置旋转速度或（和）平移速度的 X，Y 和 Z 分量

详细设置流体区域请看 6.17.1 节，固体区域请看 6.18.1 节

！ 混合平面界面两侧的单元区域都要定义旋转轴，包括静止区域。

3.定义壁面的速度边界条件，速度可以定义为绝对速度．也可以定义为相对于步骤 2 定义邻近区域的速度。

如果壁面随着旋转参考系运动（因此相对旋转参考系是静止的）这时将其角速度设为零会比较方便。同理，非旋转坐标参考坐标系中的静止壁面在绝对参考坐标系中的速度应设为零。这样设置壁面速度是为了避免在流体计算域的旋转速度发生变化时，修改速度参数。

下给定相对速度的的一个例子：如果叶片定义为 wall－３，叶片半径范围内的流体区域定义为 fluid－５，这时你要定义 fluid－５的角速度和旋转轴然后定义 wall－３的相对速度为零．如果以后要模拟一个在另一个角速度下运行的叶片，那么你只需要改变流体区域的角速度，而不需要修改壁面的速度条件．

参数详细设置请看 6.13.1 节。

4.定义速度入口（velocity inlets）的速度和压力入口（pressure inlets）和质流入口的流动方向和全压。对于速度进口，既可以定义绝对速度也可以相对于邻近区域的速度。对压力入口和质流入口，参数的定义总是绝对的，因为混合平面模型的计算总是使用绝对速度规则．对于质流入口，如 6.5.1 所述，不需要给定质流速度，或质量流量当你建立混合平面时 FLUENT 自动选择 Mass Flux Average Mass Flux 赋值方法．

参数详细设置请看 6.3.1，6.4.1 节和 6.5.1 小节。

！注意混合平面界面的出口边界必须定义为压力出口，入口边界可以定义为速度

入口（仅对于不可压缩流体），压力入口，质流入口．入口与出口边界条件可以根据求解器的要求任意组合。需要记住的是，如果在混合平面处要求质量守恒，那么就需要把下游入口边界设成质流入口。如果设成速度入口或压力入口，那么混合平面处质量就不守恒。

5．在 Mixing plane 面板（图 9.4.3）中定义混合平面

Define ⟶Mixing Planes...

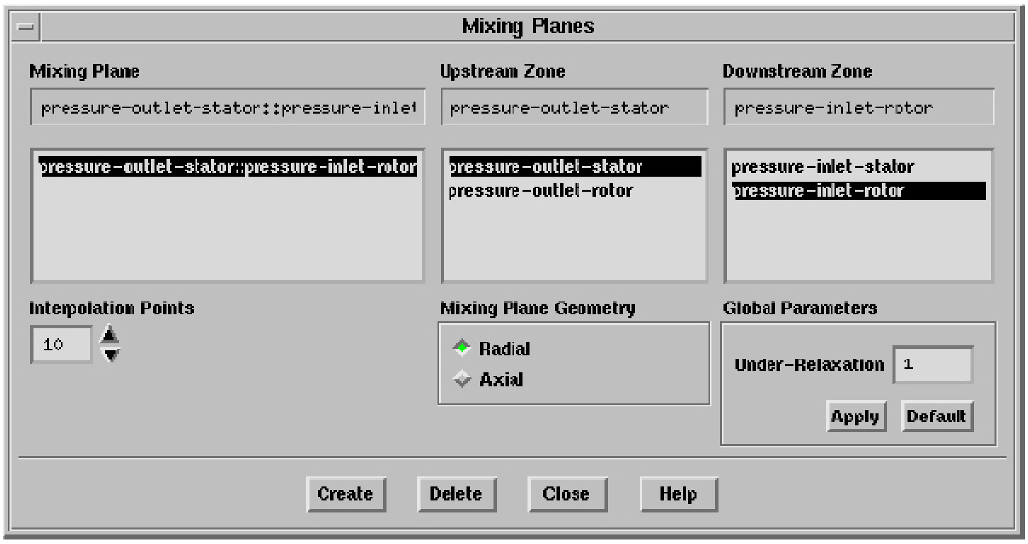


Figure 9.4.3: The Mixing Planes Panel

（a） 通过在 Upstream Zone 列表中选择一个上游区域，在 Downstream Zone 列表中选择一个下游区域来给出组成混合平面的两个区域。

（b） （仅对于 3 维）在 Mixing Plane Geometry（混合平面几何体）下选择其中一个选项来说明混合平面的几何形状。

径向几何体意味着混合平面的信息被周向平均到沿径向变化的 profiles（特征参数？）中，如 $p(r)$,$T(r)$。这种情况用在如轴流机械中。轴流几何体意味着周向平均 profiles 在轴向构建，如 $p(x)$，$T(x)$.这种情况用在径向流机械中．

！注意：径向指垂直于流动区域旋转轴，轴向指平行于流动区域旋转轴．

（c）（仅对于 3 维）设置插值点（Interpolation Points）的个数。这是建立边界 profiles 的周向平均所用的径向或轴向位置的个数。应当把这个数字设置成近似等于面网格在径向或轴向的分辨率。虽然你想设置得更多，边界 profiles 的分辨率仅仅决定于面网格的分辨率。

2 维流动中在整个分界面上平均从而建立有只一个数据点构成的 profile。因此对 2 维的问题不用设置 interpolation Point 的个数，也不用选择一 Mixing Plane Geometry。

（d）为混合平面设置 Globe Parameter（全局参数）

（i）设置 Under－relaxaton（低松弛因子）。有的时候我们希望混合平面边界上的数值变化松弛一些，在求解迭代的的初期变化得太快会使计算发散。通过把低松弛因子设置成小于一，变化就会松弛下来。新的边界 profiles 值由下式计算：

$$\phi_{\text{new}} = \phi_{\text{old}} + \alpha(\phi_{\text{calculated}} - \phi_{\text{old}}) \qquad (9.4\text{-}4)$$

其中α是其松弛因子。一旦建立了流场，就可以增加α的值。

（ii）点击 Apply（确定）设定 Global　Parameters（全局参数）。点击 Apply 右侧的 Default 可以把 Global　Parameter 恢复到的默认设置。只是 Default 就会变成 Reset，点击 Reset 可以恢复把 Global　Parameter 恢复到最近一次应用的数值。

（e）点击 Creat（创建）建立一个混合平面，Fluent 会连接所选的上游区域和下游区域的名称给新建混合平面命名，并显示在 Mixing　Plane 列表中。

如果建立了错误的混合平面，那可以在 Mixing　Plane 列表中选中它，然后点击 Delete 将其删除。

建模选项

在使用混合平面模型是有两个可用的选项:固定不可压流的压力水平和旋量守恒。

固定不可压流的压力水平

对于某些涡轮机械的构造如转矩变换器,在使用混合平面模型没有固定的压力边界。混合平面通常用来模拟连接转矩变换器部件的三个界面。在这种结构中,压力是不固定的。压力的无界波动会导致计算结果很难收敛。

为了解决这个问题，Fluent 提供了这个选项。如果这个选项被激活，Fluent 通过在每步迭代之后减去最靠近 Operaing　Conditions 面板中设定的 Reference Pressure　Location（参考压力点）的单元中的压力值来调整表压力场。

！这个选项仅适合于使用解耦求解器的不可压缩流动

在 fluent 提示符后输入如下文本命令来激活固定压力选项。

define ⟶ mixing-planes ⟶ set ⟶ fix-pressure-level

混合平面的旋量守恒

如 9.4.2 节所述对于像转矩变换器这样的应用旋量守恒是非常重要的。如果你想激活旋量守恒可以使用如下文本命令。

define ⟶ mixing-planes ⟶ set ⟶ conserve-swirl

使用 enable？文本命令可以打开旋量守恒。一旦这个选项被打开就可以要求求解器在计算过程中报告旋量守恒的信息。如果打开 verbosity?,Fluent 就会详细报告每步迭代中旋量守恒的区域的区域 ID，上游和下游每个区域的旋量积分，以及修正前后上下游旋量积分的比值。

9.4.4 混合平面问题的求解策略

只要混合平面附近没有明显的回流,混合平面模型可以合理的近似的求解流体问题。如果出现明显的回流，混合平面就不能满意的求解
实际的流动。在数值模拟中，即使收敛后没有回流，在迭代的初期也经常会出现回流现象。因此在这些问题中首先在定转子的界面用固定的条件获得临时的解，然后再激活混合平面模型以使计算收敛。

对于用混合平面法有些棘手的问题是混合平面边界处的的值变化低松弛一些会有些帮助。在很多情况下把低松弛因子设成小于 1 是有利的。一旦流场建立以后你可以逐渐增大低松弛因子。

9.4.5 混合平面的后处理

当使用混合平面模型求解问题时，你可以对绝对速度或相对速度进行绘图。对于任何速度参数（如 Velocity Magnitude and Mach Number 速率和马赫数），相应的相对量都可用（如 Relative Velicity Magnitude and Relative Mach Number 相对速率和相对马赫数）．这些参数都包括在后处理面板中的变量选择下拉菜单中的 Velocity...类中．对于总压总温以及任意依赖与相对参考坐标系的具有动力学属性的其他参数，都可以对其相对值进行后处理。

当对速度向量进行绘图时，你可以选择在绝对坐标系中画（默认），也可以在向量下拉菜单中选择相对速度来画相对于在参考区域的平移／旋转速度的相对速度。

25.9 节详细讲述了涡轮机械的详细后处理特征。

9.5 滑动网格

9.5.1 概要

当转子和定子的交互作用应用实时解法(而不是时均解法)时，必须用滑动网格模型计算非稳态流场。如 9.1 节所提到，滑动网格模型是模拟多移动参考系流场的最精确方法，也是计算量最大的。

滑动网格模拟的非稳态问题大部分是时间周期性的。也就是，非稳态问题移动区域的速度是周期复现的。然而，你也可以模拟另外一些瞬态问题，包括平移的滑动网格区域（例如通过同一隧道的两汽车或火车，如图 9.5.1）

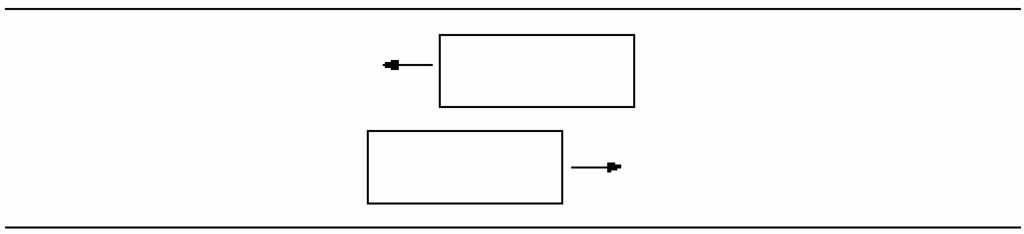


Figure 9.5.1: Two Passing Trains in a Tunnel

注意：在固定和移动部分（比如当只有转子）之间没有交互作用的流体，该计算区域可选择旋转参考系成为固定部分。（详见 9.2 节）。当有转子和定子的交互作用（如图 9.5.2 和 9.5.3 的例子）时，必须使用滑动网格。如果有兴趣于稳态近似交互作用问题，可以使用 MRF 模型或混合平面模型，如 9.3 和 9.4 节所述。

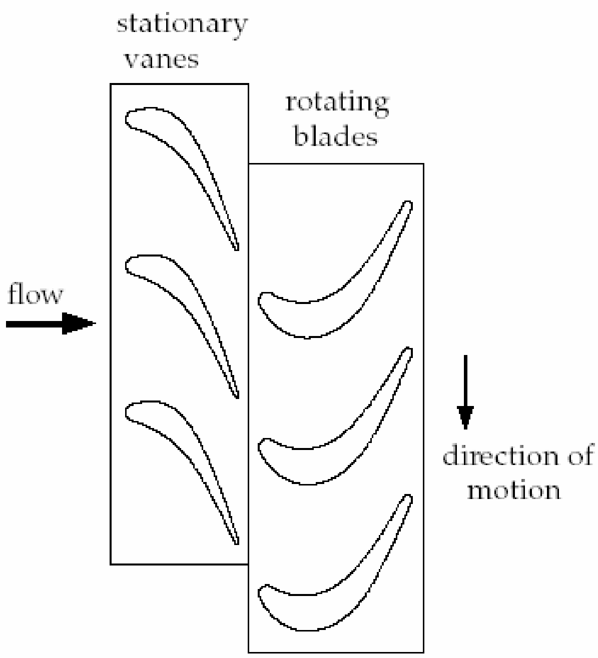


Figure 9.5.2: Rotor-Stator Interaction (Stationary Guide Vanes with Rotating Blades)

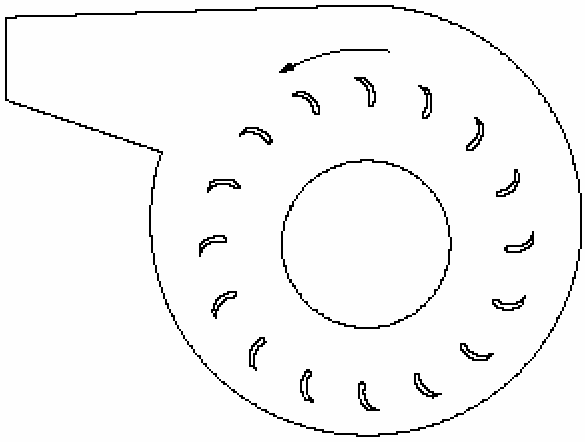


Figure 9.5.3: Blower

滑动网格技术

在滑动网格技术用到两个或更多的单元区域。（如果在每个区域独立划分网格，则必须在开始计算前合并网格，如 5.3.10 节所述。）每个单元区域至少有一个边界的分界面，该分界面区域和另一单元区域相邻。相邻的单元区域的分界面互相联系形成“网格分界面”。这两个单元区域互相之间相对沿网格分界面移动。

！注意：网格分界面必须定位，因为两边均有流体单元。例如，如图 9.5.2 的几何体的网格分界面必须位于转子和定子之间的流体区域；而不能在转子或定子边缘的任何部分。

在计算过程中，单元区域在离散步骤中沿着网格分界面相互之间滑动（比如旋转或平移）。图 9.5.4 和 9.5.5 两网格的起始位置和产生一些平移之后的位置。

由于旋转或平移的产生，不需要网格分界面的节点队列。由于流动是内在非稳态的，所以需要时间解决程序。

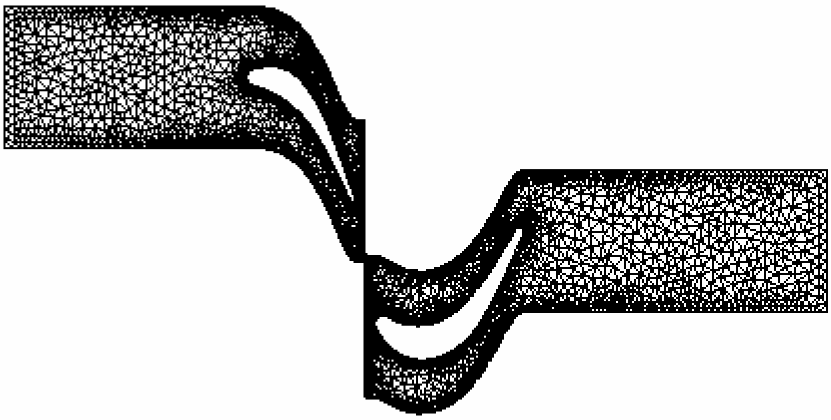


Figure 9.5.4: Initial Position of the Grids

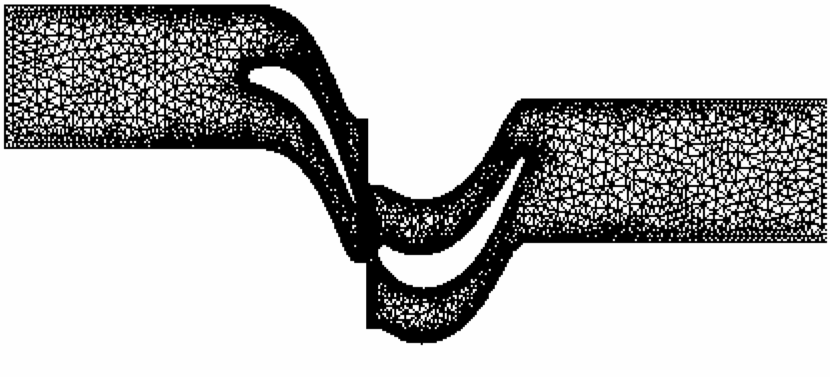


Figure 9.5.5: Rotor Mesh Slides with Respect to the Stator

网格分界面形状

假设两分界面边界基于同样的几何体，网格分界面和相联系的分界面可以是任何形状。图 9.5.6 是线性网格分界面的例子，图 9.5.7 是圆弧网格分界面的例子。（两图的网格分界面以虚线表示。）

如把图 9.5.6 伸展为 3D 时网格分界面将是平面矩形，如把图 9.5.7 伸展为 3D 时网格分界面将是圆柱体。

图 9.5.8 是圆锥形分界面的应用例子。（斜线表示在 2D 平面上的圆锥形的分界面的交线）

对于轴向的转子 / 定子构造，其旋转和静止部分沿轴线成一行，而不是同中心的（见图 9.5.9），分界面是平面扇形。该平面扇形是垂直于旋转轴的截断面的区域，旋转轴沿着转子和定子之间的轴线位置。

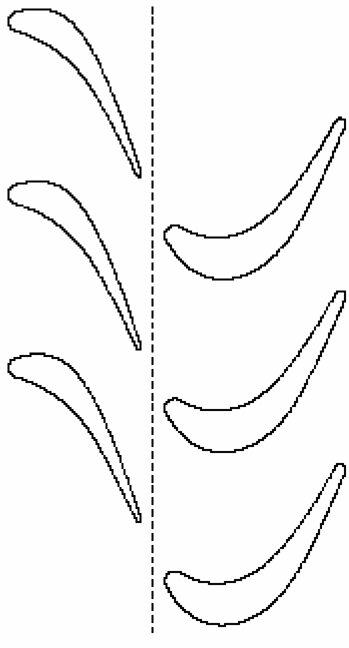


Figure 9.5.6: 2D Linear Grid Interface

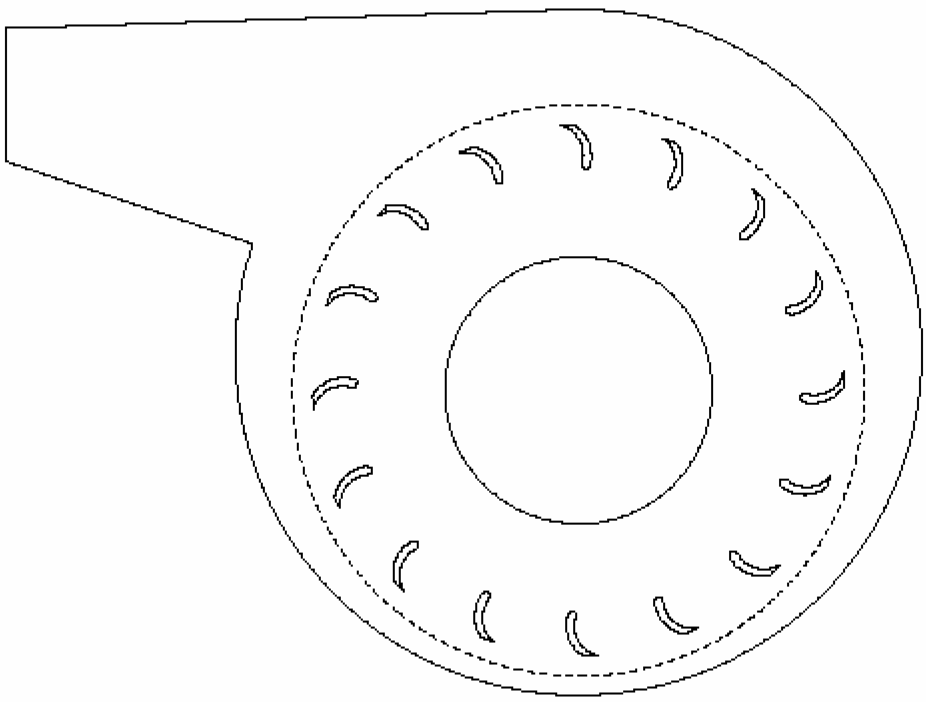


Figure 9.5.7: 2D Circular-Arc Grid Interface

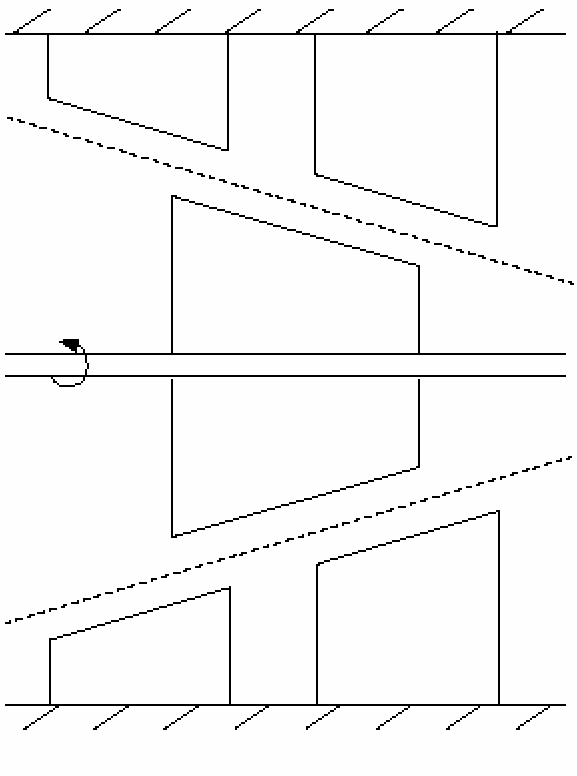


Figure 9.5.8: 3D Conical Grid Interface

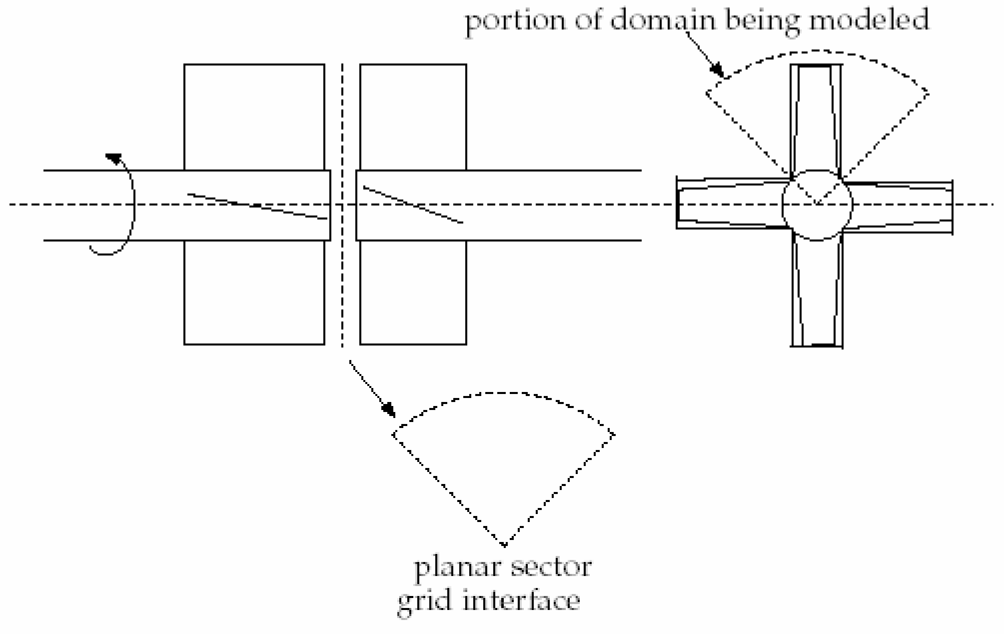


Figure 9.5.9: 3D Planar-Sector Grid Interface

9.5.2 滑动网格原理

如 9.5.1 节所论，滑动网格模型允许相邻网格之间相对滑动。因此，网格面不需要在分界面上排列。这种情况下需要方法来计算流进每个网格分界面的两个非一致的分界面区域。

为了计算界面流动，在每一新的时间步长确定分界面区域的交界处。作为结果的交界面产生了内部区域（在两边都有流体单元的区域）和一个或多个周期区域。如果不是周期性的问题，那么交界面产生一个内部区域和两个壁面区域（假如两个分界面区域完全交界则没有壁面区域），如图 9.5.10 所示。（壁面需要改变一些适当的边界类型。）重叠的分界面区域对应所产生的内部区域；不重叠的区域对应所产生的周期性区域。在这些交界面区域的面的数目随着分界面相对移动而不同。理论上，网格分界面的流量应该根据两分界面的交叉处所产生的面来计算，而不是根据它们各自的分界面的面。

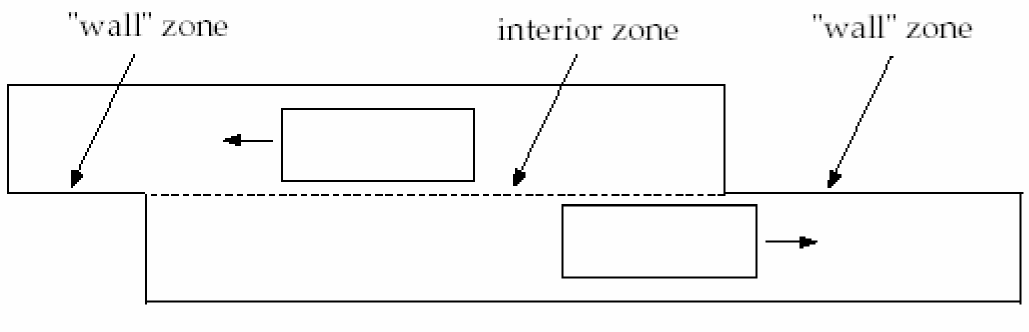


Figure 9.5.10: Zones Created by Non-Periodic Interface Intersection

在图 9.5.11 的例子里，分界面区域由 A-B 面和 B-C 面以及 D-E 面和 E-F 面组成，交叉处产生 a-d 面、d-b 面和 b-e 面等。在两个单元区域重叠处产生 d-b 面、b-e

面和 e-c 面而组成内部区域，剩余的 a-d 和 c-f 面成对形成周期性区域。例如，计算分界面流入Ⅳ单元的流量时，用 d-b 面和 b-e 面代替 D-E 面，并从Ⅰ单元和III单元各自传递信息到Ⅳ单元。

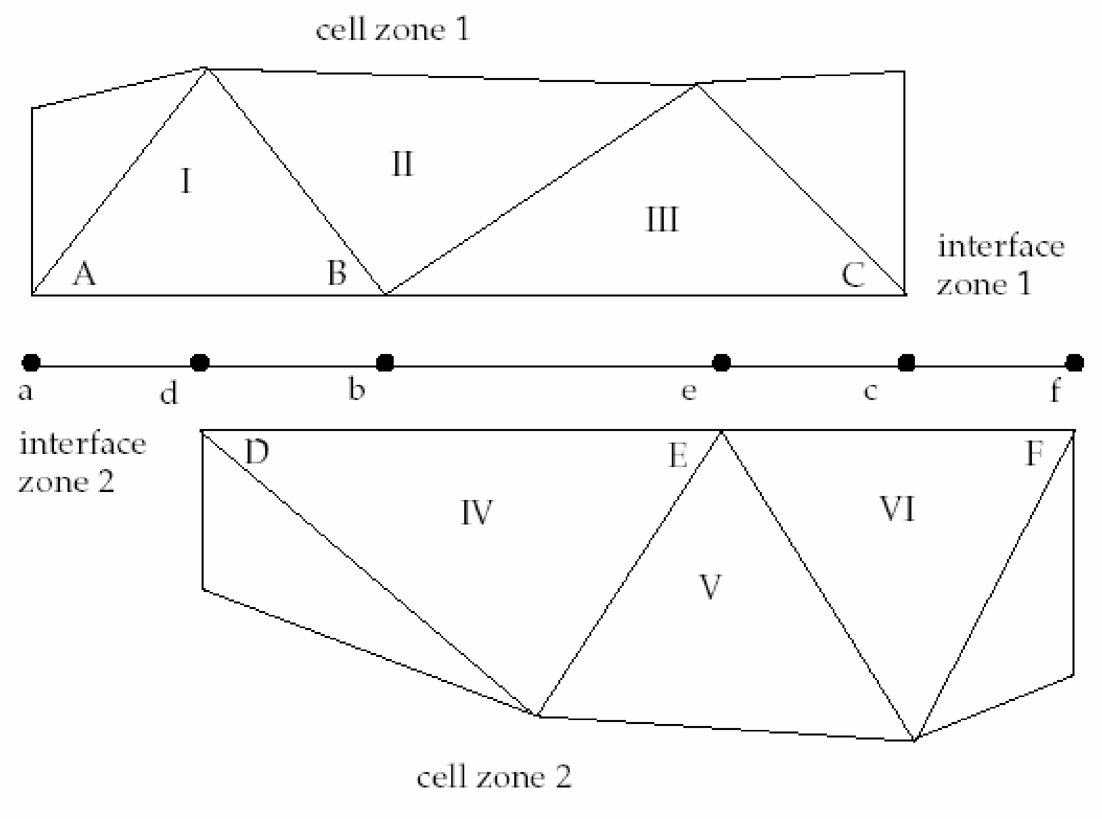


Figure 9.5.11: Two-Dimensional Grid Interface

9.5.3 滑动网格的建立和解法

网格的前提条件

在 FLUENT 问题建立开始之前，确定创建的网格满足以下要求：

- 不同的单元区域存在于不同滑动速度的范围的每一部分。
- 网格分界面必须位于没有该面的法线运动的位置
- 网格分界面可以是任意形状（包括 3D 曲面），假定两分界面的边界是基于同一几何体。如果网格有明显特征（比如 90 度角），分界面两边几乎遵循该特征是十分重要的。
- 如果创建的是多单元区域的单一网格，必须保证每个单元在滑动边界有明显的面域。相邻单元的面有一样的位置和形状，但面对应于各自的一个单元。（注意也可以每个单元各创建一个独立网格文件，然后再如 5.3.10 节所述合并它们）
- 如果是用周期性模拟一个转子 / 定子几何体，转子叶片网格的周期角度必须和静止叶片的角度相等。
- 创建网格分界面之前必须正确定位所有的周期性区域（旋转的或者平移的）
- 对于 3D 例子，如果分界面是周期性的，那么只有一对周期边界和分界面相邻。

有关这些约束和 FLUENT 的滑动网格模型的全面信息详见 9.5.1 节。

问题的建立

建立滑动网格问题的步骤如下。（注意该过程只包括滑动网格模型的必要步骤；其他模型、边界条件等也需如常建立。）

1.在 **Solver** 面板激活非稳态流动模型的适当选项。（详见 **FLUENT**24.15 节有关非稳态模型的性能。）

Define ⟶ Models ⟶ Solver...

2.设置滑动运动的边界条件

Define ⟶ Boundary Conditions...

（a） 在 **Boundary Conditions** 面板改变分界面区域和邻近单元的类型为 **interface**

（b） 在 **Fluid** 面板或 **Solid** 面板设置移动的流体或固体区域，在 **Motion Type** 下拉菜单选 **Moving Mesh** 并设置平移或旋转速度。（注意固体区域和邻近流体区域不能以不同速度移动。）

！注意同时的平移和旋转只有在旋转轴和平移方向一致时才能模拟（比如原点固定）。

缺省的壁面速度相对邻近的网格运动设为零值。对于邻近移动网格的壁面来说结果是一个在网格参考系下的“非滑动”条件。因此，必须修改壁面速度边界条件除非在绝对坐标系中壁面是静止的，即在相对坐标系中是移动的。详见 6.13.1 节有关壁面运动。

详见第 6 章有关边界条件的输入

3.在 **Grid Interface** 面板定义网格分界面（图 9.5.12）。

Define ⟶ Grid Interfaces...

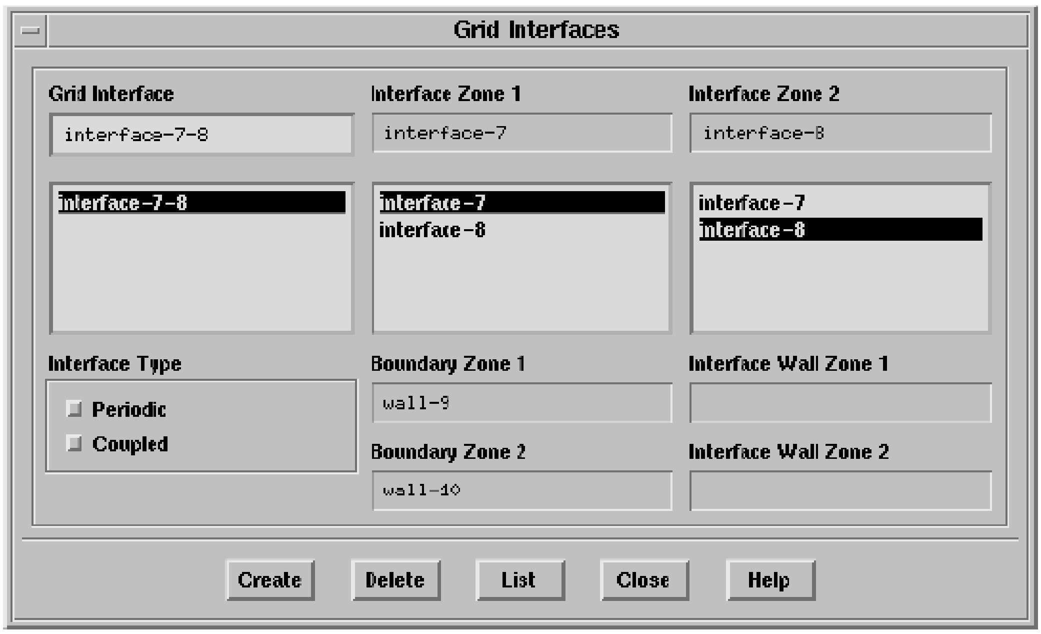


Figure 9.5.12: The Grid Interfaces Panel

（a） 在 **Grid Interface** 框里输入分界面的名字

（b） 确定组成网格分界面的两分界面区域，在 **Interface Zone1** 和 **Interface Zone 2** 列表中各选择一个。（次序无关）

（c） 设置 **Interface Type**，如果适当，有两个选项。

- 对于周期性问题，激活 **Periodic**
- 分界面位于固体和流体区域，激活 **Coupled**

（d） 点击 **Create** 建立新的网格分界面

对于所有分界面类型，Fluent 创建了分界面的边界区域（例如 **Wall-9**，**Wall-10**），在 **Interface Zone1** 和 **Interface Zone 2** 下出现。可使用 **Boundary Conditions** 面板改变它们的区域类型（例如 pressure far-field，symmetry，pressure outlet）。

如果创建了一个错误的网格分界面，可以在在 **Grid Interface** 框里选择该分界面，点击 **Delete** 按钮删除它。（删除分界面同时也删除了任何边界区域。）

! 完成问题建立之前，保存原来的 Case 文件以便返回到原来的网格位置（比如在滑动产生之前的位置）。Case 文件存储了网格位置，所以在非稳态计算使不同时间保存 Case 文件可以保存不同的网格位置。

Solving the Problem

通过初始化解决开始滑动网格计算（如 24.13.1 节所述），并且在 **Iterate** 面板确定时间步长和步骤数目，正如其他的非稳态计算。（详见 24.15 节有关时变性解法。注意到可在初始 Case 文件里保存时间步长，在开始 Iterate 时点击 **Apply** 而不是 **Iterate** 并保存 Case 文件。）**Fluent** 重复当前的时间步计算直到达到满意的残留数，或者达到了迭代重复计算最大数。当时间步进时，单元和壁面自动移动依据设定的平移和旋转的速度（以上 2b 步骤设置的）。新的分界面区域的交叉处自动计算并随之更新了内部／周期性／外部的边界区域（如 9.5.2 节所述）。

保存 Case 和 Data 文件

Fluent 可以自动保存滑动网格模型 **Case and Data** 文件（见 3.3.4 节）这方便保存以后预处理以连续时间步长保存结果。

!每次保存 **Data** 文件时，必须保存 **Case** 文件，因为网格位置存储在 **Case** 文件里。由于网格位置每个时间步长都在改变，所以在给定的时间步读取 Data 需要 **Case** 文件，以确保网格在正确的位置。也应该保存初始的 **Case** 文件以便容易回到网格初始位置来重新计算。

!如果你计划分几个阶段来求解滑动模型，可以根据你运行的计算时间期来保存 **Case and Data** 文件，退出 **FLUENT**，启动新的 **FLUENT** 任务，读取该 **Case and Data** 文件，继续计算一段时间，保存 **Case and Data** 文件，退出 **FLUENT**，如此反复。有可能在每次继续计算之后发生网格失真，避免这个问题，可以在保存 **Case** 文件之前删除网格分界面，在重启动 **FLUENT** 任务读入 **Case** 文件时重新创建网格分界面（如上步骤 3 所述）。

时间周期的解法

对于一些问题（如转子－定子相互作用），你可能对时间周期性解法感兴趣，也就是，对起始的瞬态行为不关心。一旦起始阶段过后，流动开始出现周期性。如果 T 是非稳态的周期，那么在给定点流场的一些流动特性函数 Φ 为：

$$\phi(t) = \phi(t + NT) \qquad (N = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (9.5\text{-}1)$$

对于旋转问题，周期（以秒表示）等于区域的扇形角度（以弧度表示）与转

速（以弧度 / 秒表示）的商：$\boldsymbol{T=\theta/\Omega}$。对于 2D 转子－定子问题，$\boldsymbol{T=P/v_b}$,这里 $\boldsymbol{P}$ 是斜度，是 $\boldsymbol{v_b}$ 叶片速度。一个周期的时间步骤数等于周期除以时间步长。当一个求解场周期没有变化（比如变化少于 5%）时，就达到了时间周期的求解。

为了确定求解是否从一个周期到下一个周期发生变化，需要对两个周期流场里同一个点进行解的比较。例如，如果周期等于 10 秒，可以对给定点 22 秒和 32 秒的解进行对比看是否达到周期性的解。如果没有，应继续计算一个周期，对比 32 秒和 42 秒之后的解，如此直到从一个周期到下一个周期解的变化很小或没有变化。你也可以以同样的方式跟踪总量，比如升力系数、阻力系数和流量。图 9.5-13 是一个升力系数的周期性解。

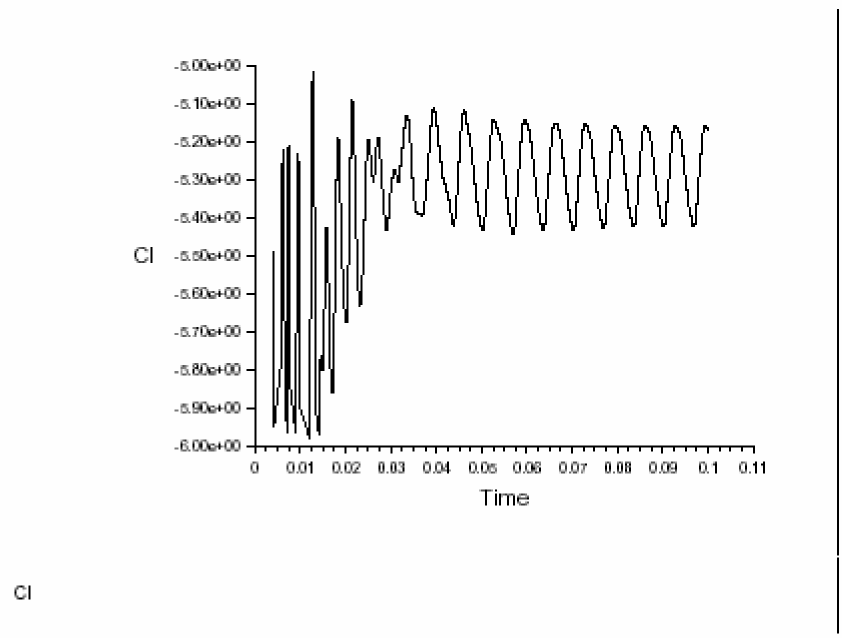


Figure 9.5.13: Lift Coefficient Plot for a Time-Periodic Solution

周期性的最终解是不依赖起始阶段解过程的时间步骤的。由于不关心流动开始阶段的精确解，因此可以在起始计算阶段可以定义“大”时间步长。以大时间步长开始计算，解能更快成为周期性。然而，当解达到周期性时，应减少时间步长以获得精确解。

！如果你用二阶时间精度求解，那么在计算过程中改变时间步长会影响当前解的精度。以大时间步长开始计算，在求解过程中改变时间步长不应超过 20%。不能在最后几个周期改变时间步长以确保解达到周期性状态。

9.5.4 滑动网格的后处理

滑动网格的后处理和其它非稳态问题一样。你可以在随时读入 **Case and Data** 文件并如常地显示和报告结果。对于空间周期性问题，可以用周期重复（在 **Views** 面板里设置，如 27.4 节所述）来显示几何体。图 9.5.14 显示了图 9.5.4 例子的转子－定子的一个瞬时流场，使用一个周期重复。

当显示速度向量时，注意到缺省显示的是绝对速度（比如惯性系、实验或参考系）。也可以选择显示相对速度，通过 **Vectors** 面板里 **Vectors Of** 的下拉菜单选择 **Relative Velocity**。在这种情况下，显示的是参考区域（在 Reference Values

面板设定）的相对平移 / 旋转速度。（参考区域的速度值等于在 **Fluid** 面板里定义该区域的值。）

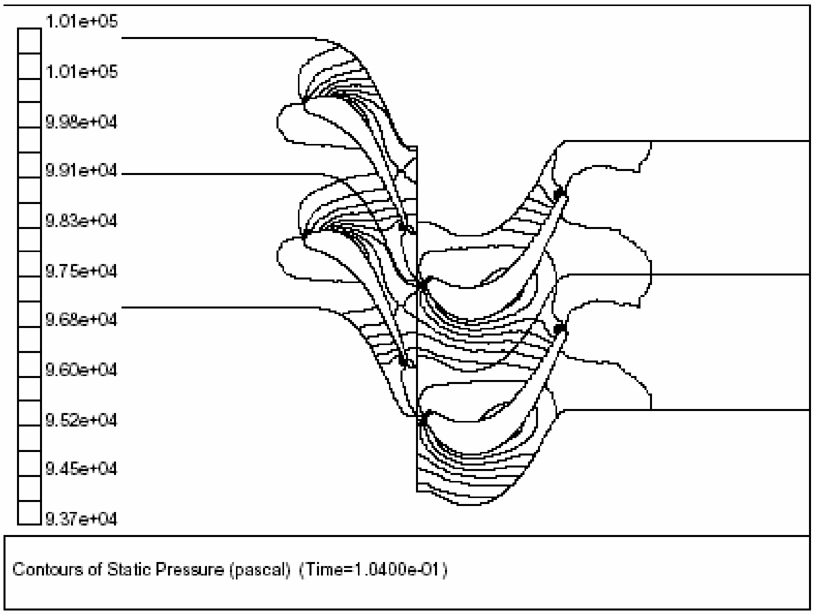


Figure 9.5.14: Contours of Static Pressure for the Rotor-Stator Example

注意到不能在交叉边界面上创建区域表面(例如从分界面交叉区域创建的内部 / 周期性 / 外部区域)。可以代替在分界面上创建区域表面。在这些面上的数据显示的是“单边”的，也就是，分界面区的节点只能“看见”在网格分界面一侧的单元。在绘跨越分界面的轮廓线时会出现轻微的不连续。也注意到，在 3D 非平面形状也能在填充轮廓图中看到小间隙。这些不连续和间隙只是图的本性，解过程没有不连续和间隙。

在 FLUENT 中也可以绘出圆周平均值的图。这可以在模型中发现不同轴线和径向位置的平均值。FLUENT 在特定的圆周区域计算平均值，然后绘出径向或轴向的平均值。更多有关 XY 圆周平均值图的产生和信息见 27.8.4 节。

9.6 非反射边界条件

9.6.1 概述和限制

可压流标准的压力边界条件在边界上给定的值都是固定的(如出口边界的静压). 结果，边界上的压力波会以一种非物理的方式反射，并导致局部失真. 对于如压缩机或叶栅等内流问题，其边界与流域内的几何体靠得非常近，上述的影响会更明显.

非反射边界条件（NRBCs）允许压力波无（欺骗性的）的反射的 " 通过 " 边界。FLUENT 中的这种方法是基于对非反射边界上的求解变量的傅里叶变换.

限制

- NRBCs 只能用于耦合显式求解器.
- 目前是应用于密度使用理想气体定律计算的稳态可压缩流动.
- 入口和出口边界条件必须是压力入口和压力出口.

! 注意压力入口边界必须在柱坐标方法给定

- 3 维几何体的入口和出口边界必须使用四边形结构网格（不允许使用三角形或四边形非结构网格）如图 9.6.1 和 9.6.2

在 2 维几何体和 3 维几何体远离出入口边界的地方可以使用非结构网格.

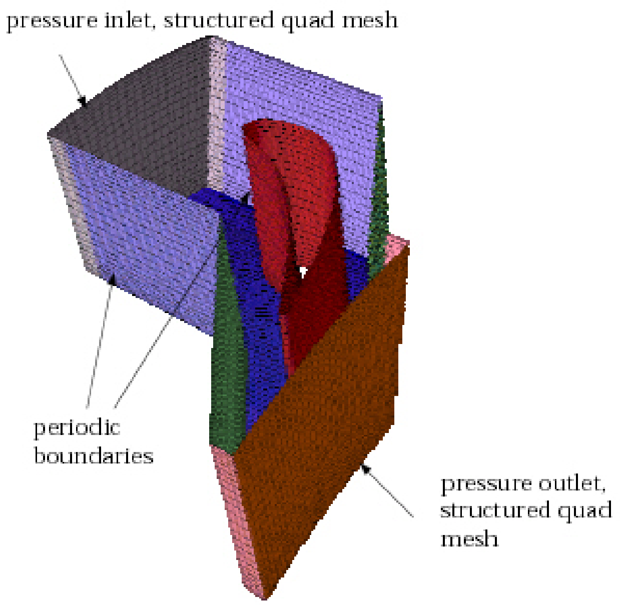


Figure 9.6.1: Mesh and Prescribed Boundary Conditions in a 3D Axial Flow Problem

9.6.2 理论

NRBCs 是基于对线性欧拉方程求解的傅里叶分解。

特征变量形式的方程

为了处理单个波，线性欧拉方程转变成特征变量（C_i）的形式。我们先来考虑线性欧拉方程的 1 维形式，它可以由与求解变量有关的特征变量来表达

（见式（9.6- 1 ）

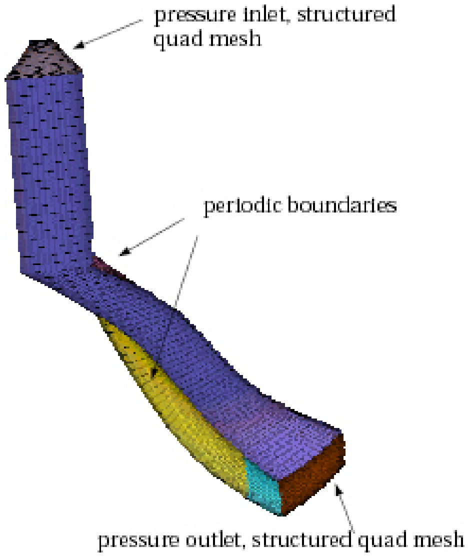


Figure 9.6.2: Mesh and Prescribed Boundary Conditions in a 3D Radial Flow Problem

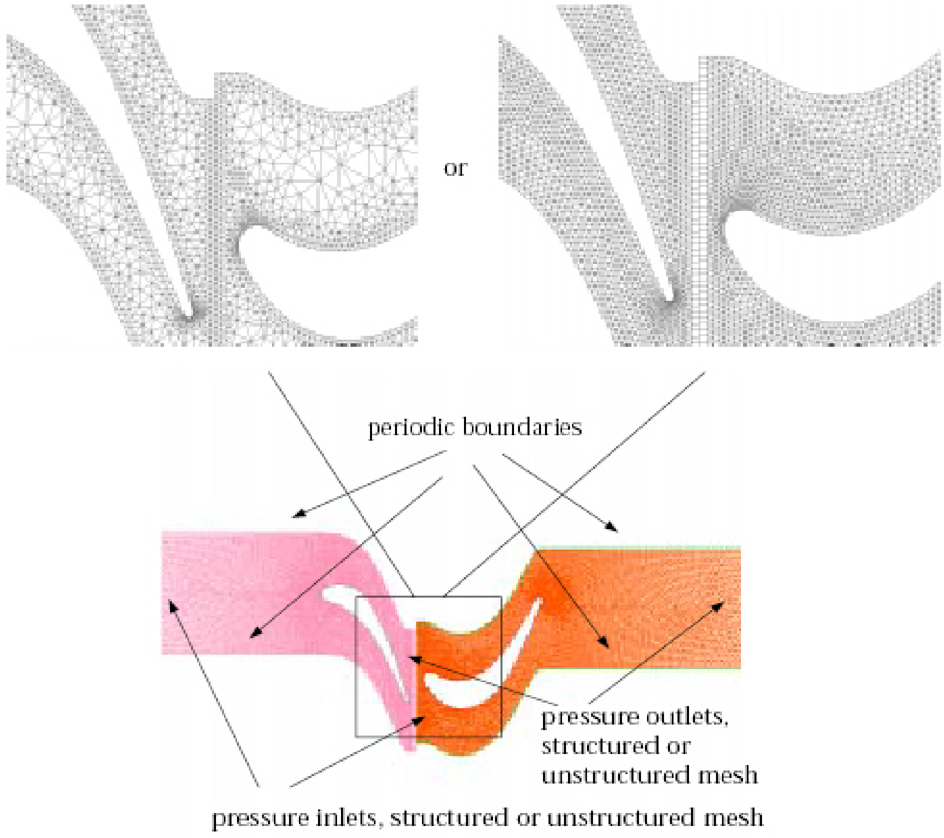


Figure 9.6.3: Mesh and Prescribed Boundary Conditions in a 2D Case

$$\tilde{\mathbf{Q}} = T^{-1}\mathbf{C} \tag{9.6-1}$$

where

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{Bmatrix} \tilde{\rho} \\ \tilde{u}_a \\ \tilde{u}_t \\ \tilde{u}_r \\ \tilde{p} \end{Bmatrix}, \; T^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\overline{a}^2} & 0 & 0 & \frac{1}{2\overline{a}^2} & \frac{1}{2\overline{a}^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\,\overline{\rho}\,\overline{a}} & \frac{1}{2\,\overline{\rho}\,\overline{a}} \\ 0 & \frac{1}{\overline{\rho}\,\overline{a}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\overline{\rho}\,\overline{a}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \; \mathbf{C} = \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{Bmatrix}$$

其中$\bar{a}$指边界区域的平均音速，$\tilde{\rho}$ ，$\tilde{u}_a$，$\tilde{u}_t$，$\tilde{u}_r$代表相同条件下的扰动（如

$\tilde{\rho} = \rho - \overline{\rho}$， $\tilde{p} = p - \overline{p}$，等等）

上述分析都基于柱坐标系统。流场变量的平均值是沿着 pitchwisef 方法平均的。

在准三维的方法中［78，155，198］，已经发展出一种方法来确定边界上特征变量的变化（表示为δC_i），使波不反射。边界上特征变量的变化由下式决定：

$$\delta\mathbf{C} = T\,\delta\mathbf{Q} \tag{9.6-2}$$

where

$$\delta\mathbf{C} = \begin{Bmatrix} \delta C_1 \\ \delta C_2 \\ \delta C_3 \\ \delta C_4 \\ \delta C_5 \end{Bmatrix}, \; T = \begin{bmatrix} -\overline{a}^2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \overline{\rho}\,\overline{a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{\rho}\,\overline{a} & 0 \\ 0 & \overline{\rho}\,\overline{a} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\overline{\rho}\,\overline{a} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \; \delta\mathbf{Q} = \begin{Bmatrix} \delta\rho \\ \delta u_a \\ \delta u_t \\ \delta u_r \\ \delta p \end{Bmatrix}$$

支出特征量的变化－一个亚音速流入特征量（δC_5），四个亚音速流出特征量（δC_1～δC_4）－通过流场变量使用方程 9.6- 2 的外推决定.

收入特征量的变化－四个亚音速流出特征量（δC_1～δC_4），一个亚音速流入特征量（δC_5）－被分成两部分：一部分是边界上的平均变化（$\delta\overline{C_i}$），另一部分是由于边界上的谐波变化引起的特征量的局部变化δC_{iL}。如下式所示：

$$\delta C_{i_j} = \delta C_{\mathrm{iold_j}} + \sigma \left(\delta C_{\mathrm{inew_j}} - \delta C_{\mathrm{iold_j}} \right) \tag{9.6-3}$$

$$\delta C_{\mathrm{inew_j}} = \left(\delta \overline{C}_i + \delta C_{iL_j} \right) \tag{9.6-4}$$

其中 i＝1,2,3,4 表示在入口边界上，i= 5 表示在出口边界上，j＝1，. . . ，N 表示沿 pitchwise 方向的网格角标包括周期点。σ 是低松驰因子默认值是 0.75。注意假定沿 pitchwise 方向周期求解。

流动由傅里叶分解方法成平均和周向两部分。傅里叶第 0 模式对应于平均圆周解，并且根据标准 1D 特征量理论处理。解的残余部分以谐波函数无穷级数表示，并且以 2D 非反射边界条件处理［78]。

入口边界：

对于亚音速流动,由方程 9.6-2 确定一个流出特征量（δC_5）和由方程 9.6-3 计算的四个亚音速流入特征量（δC_1～δC_4）。需要确定熵（s），径向和切向流动角度(α_r 和 α_t)和滞止焓(h_0)来计算流入特征量的平均变化。注意到在 FLUENT 里你可以确定入口的 P_0 和 T_0，所以容易从这得到 s_{in} 和 h_{0in}。这等价于强制下列四个残留数为零：

$$R_1 = \overline{\rho} \left(\overline{s} - s_{\mathrm{in}} \right) \tag{9.6-5}$$

$$R_2 = \overline{\rho}\, \overline{a} \left(\overline{u}_t - \overline{u}_a \tan \alpha_t \right) \tag{9.6-6}$$

$$R_3 = \overline{\rho}\, \overline{a} \left(\overline{u}_r - \overline{u}_a \tan \alpha_r \right) \tag{9.6-7}$$

$$R_4 = \overline{\rho} \left(\overline{h}_0 - h_{0_{\mathrm{in}}} \right) \tag{9.6-8}$$

where

$$s_{\mathrm{in}} = \gamma \ln \left(T_{0_{\mathrm{in}}} \right) - (\gamma - 1) \ln \left(p_{0_{\mathrm{in}}} \right) \tag{9.6-9}$$

$$h_{0_{\mathrm{in}}} = c_p T_{0_{\mathrm{in}}} \tag{9.6-10}$$

从残留数的线性化可以得到平均特征量，如下（图 9.6.4 是所描述的入口角度的定义的图解）：

$$\begin{Bmatrix} \delta\overline{C}_1 \\ \delta\overline{C}_2 \\ \delta\overline{C}_3 \\ \delta\overline{C}_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tan\alpha_t}{(1-\gamma)\mathrm{M}} & \frac{\mathrm{M}_1}{\mathrm{M}} & \frac{-\mathrm{M}_t}{\mathrm{M}} \tan\alpha_t & \frac{\tan\alpha_t}{\mathrm{M}} \\ \frac{\tan\alpha_r}{(\gamma-1)\mathrm{M}} & \frac{\mathrm{M}_t}{\mathrm{M}} \tan\alpha_t & \frac{\mathrm{M}_2}{\mathrm{M}} & \frac{-\tan\alpha_r}{\mathrm{M}} \\ \frac{2}{(\gamma-1)\mathrm{M}} & 2\frac{\mathrm{M}_t}{\mathrm{M}} & 2\frac{\mathrm{M}_r}{\mathrm{M}} & \frac{-2}{\mathrm{M}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{Bmatrix} \tag{9.6-11}$$

where

$$
\begin{aligned}
\mathrm{M_a} &= \frac{\overline{u}_a}{\overline{a}} && (9.6\text{-}12)\\
\mathrm{M_t} &= \frac{\overline{u}_t}{\overline{a}} && (9.6\text{-}13)\\
\mathrm{M_r} &= \frac{\overline{u}_r}{\overline{a}} && (9.6\text{-}14)
\end{aligned}
$$

and

$$\mathrm{M} = 1 + \mathrm{M_a} - \mathrm{M_t} \tan\alpha_t + \mathrm{M_r} \tan\alpha_r \qquad (9.6\text{-}15)$$

$$\mathrm{M_1} = -1 - \mathrm{M_a} - \mathrm{M_r} \tan\alpha_r \qquad (9.6\text{-}16)$$

$$\mathrm{M_2} = -1 - \mathrm{M_a} - \mathrm{M_t} \tan\alpha_t \qquad (9.6\text{-}17)$$

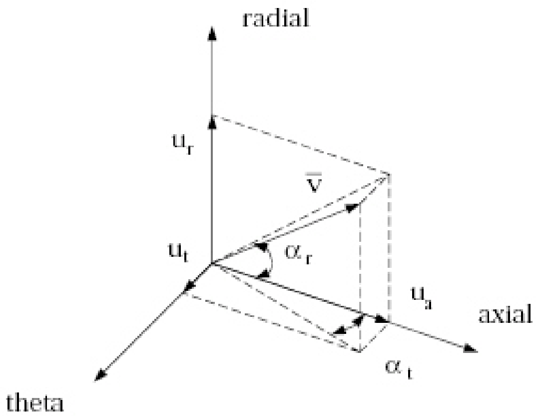


Figure 9.6.4: Prescribed Inlet Angles

where

$$|v| = \sqrt{u_t^2 + u_r^2 + u_a^2} \qquad (9.6\text{-}18)$$

$$
\begin{aligned}
e_t &= \frac{u_t}{|v|} && (9.6\text{-}19)\\
e_r &= \frac{u_r}{|v|} && (9.6\text{-}20)\\
e_a &= \frac{u_a}{|v|} && (9.6\text{-}21)
\end{aligned}
$$

$$\tan\alpha_t = \frac{e_t}{e_a} \qquad (9.6\text{-}22)$$

$$\tan\alpha_r = \frac{e_r}{e_a} \qquad (9.6\text{-}23)$$

为表达沿着流入边界每个 j 网格点的当地特征量的改变，引入了以下的关系式：

$$\begin{aligned}
\delta C_{1L_j} &= \overline{p}\left(s_j-\overline{s}\right)\\
\delta C_{2L_j} &= C'_{2_j}-\overline{\rho a}\left(u_{t_j}-\overline{u}_t\right)\\
\delta C_{3L_j} &= -\overline{\rho a}\left(u_{r_j}-\overline{u}_r\right)\\
\delta C_{4L_j} &= \frac{-2}{\left(1+\mathrm{M}_{a_j}\right)}\left(\frac{1}{\gamma-1}\delta C_{1L_j}+\mathrm{M}_{t_j}\delta C_{2L_j}+\mathrm{M}_{r_j}\delta C_{3L_j}+\overline{p}\left(h_{0_j}-\overline{h}_0\right)\right)
\end{aligned} \tag{9.6-24}$$

注意到第一和第四当地特征量的关系强迫当地熵和滞止焓匹配它们的平均稳态值。

特征变量 C'_{2j} 是从第二特征量的逆离散傅里叶变换计算而来的。而第二特征量的离散傅里叶变换依次是和第五特征量的离散傅里叶变换相关。因此，特征变量 C'_{2j} 沿着斜度计算如下：

$$C'_{2_j}=2\Re\left(\sum_{n=1}^{\frac{N}{2}-1}\hat{C}_{2n}\exp\left(i2\pi n\frac{\theta_j-\theta_1}{\theta_N-\theta_1}\right)\right) \tag{9.6-25}$$

傅里叶系数 C'_{2n} 和一系列等距的分布式的特征变量 C^*_{5j} 以以下式子相联系：

$$\hat{C}_{2_n}=\begin{cases}-\frac{\overline{u}_t+B}{N\left(\overline{a}+\overline{u}_a\right)}\sum_{j=1}^{N}C^*_{5_j}\exp\left(-i2\pi\frac{jn}{N}\right) & \beta>0\\ -\frac{\overline{u}_t+B}{\overline{a}+\overline{u}_a}C_{5_j} & \beta<0\end{cases} \tag{9.6-26}$$

where

$$B=\begin{cases} i\sqrt{\beta} & \beta>0\\ -\operatorname{sign}\left(\overline{u}_t\right)\sqrt{|\beta|} & \beta<0\end{cases} \tag{9.6-27}$$

and

$$\beta=\overline{a}^2-\overline{u}_a^2-\overline{u}_t^2 \tag{9.6-28}$$

一系列等距的分布式的特征变量 C^*_{5j} 是由任意分布的 C_{5j} 用立方样条插值计算，这里

$$C_{5_j}=-\overline{\rho}\;\overline{a}\left(u_{a_j}-\overline{u}_a\right)+\left(p_j-\overline{p}\right) \tag{9.6-29}$$

对于超音速流动，用户定义的静压（P_{Sin}）以及总压（P_{0in}）和总温度（T_{0in}）就足以确定入口流动状态。

出口边界

对于亚音速流出，有四个亚音速流出特征量（δC_1～δC_4）用方程 9.6-2 计算，且由方程 9.6-3 确定的有一个流入特征量（δC_5）。在流入的第五个特征量的平均值由下式给出：

$$\delta\overline{C}_5 = -2\left(\overline{p} - p_{\text{out}}\right) \qquad (9.6\text{-}30)$$

这里$\overline{P}$是出口端面的流体的平均压力，P_{out}是出口压力预测的平均值（该值由单一叶片技术确定或从赋值的定形叶混合面获得）。当地变化（δC_{5Lj}）以下式给出：

$$\delta C_{5L_j} = C'_{5_j} + \overline{\rho}\ \overline{a}\left(u_{a_j} - \overline{u}_a\right) - \left(p_j - \overline{p}\right) \qquad (9.6\text{-}31)$$

特征变量C'_{5j}沿着斜度计算如下：

$$C'_{5_j} = 2\Re\left(\sum_{n=1}^{\frac{N}{2}-1} \hat{C}_{5_n} \exp\left(i2\pi n \frac{\theta_j - \theta_1}{\theta_N - \theta_1}\right)\right) \qquad (9.6\text{-}32)$$

傅里叶系数$\hat{C}_{5n}$和两系列等距分布式的特征变量（分别是C^*_{2j}和C^*_{4j}）相关，以下式给出：

$$\hat{C}_{5_n} = \begin{cases} \frac{A_2}{N}\sum_{j=1}^{N} C^*_{2_j} \exp\left(i2\pi\frac{jn}{N}\right) - \frac{A_4}{N}\sum_{j=1}^{N} C^*_{4_j} \exp\left(i2\pi\frac{jn}{N}\right) & \beta > 0 \\ A_2 C_{2_j} - A_4 C_{4_j} & \beta < 0 \end{cases} \qquad (9.6\text{-}33)$$

where

$$A_2 = \frac{2\overline{u}_a}{B - \overline{u}_t} \qquad (9.6\text{-}34)$$

$$A_4 = \frac{B + \overline{u}_t}{B - \overline{u}_t} \qquad (9.6\text{-}35)$$

这两个等距分布特征变量（C^*_{2j}和C^*_{4j}）是用立方样条插值从任意分布式C_{2j}和C_{4j}特征量计算，这里

$$C_{2_j} = \overline{\rho}\,\overline{a}\left(u_{t_j} - \overline{u}_t\right) \tag{9.6-36}$$

$$C_{4_j} = \overline{\rho}\,\overline{a}\left(u_{a_j} - \overline{u}_a\right) + (p_j - \overline{p}) \tag{9.6-37}$$

对于超音速流出，所有流场变量是从内部外推的。

更新流动变量

一旦流入和流出边界的特征量的变化被确定，流量的变化δQ可从方程 9.6-2 获得。因此，边界面的流动变量值等于下式：

$$p_f = p_j + \delta p \tag{9.6-38}$$
$$u_{a_f} = u_{a_j} + \delta u_a \tag{9.6-39}$$
$$u_{t_f} = u_{t_j} + \delta u_t \tag{9.6-40}$$
$$u_{r_f} = u_{r_j} + \delta u_r \tag{9.6-41}$$
$$T_f = T_j + \delta T \tag{9.6-42}$$

9.6.3 应用非反射边界条件

应用 NRBCs 的过程如下：

1.用 non-reflecting 文本命令打开 NRBCs：

```
define → boundary-conditions → non-reflecting →
enable?
```

如果你不确信 NRBCs 是否打开，可使用 show-status 文本命令

2.用 initialize 文本命令初始化 NRBC

```
define → boundary-conditions → non-reflecting →
initialize
```

如果初始化成功，会显示该区域的总结输出。如果初始化不成功，会显示错误的提示和指出问题的所在。

3.如果需要，在 set/子菜单修改参数：

```
define → boundary-conditions → non-reflecting → set
```

under-relaxation 允许你设置方程 9.6-3 的超松弛因子σ。默认值是 0.75。

discretization 允许你设置离散方案。缺省设置是使用高阶重构造。

verbosity 允许你控制在 NRBC 计算中信息输出到控制台的数量

- 0：无记载
- 1：基本信息（缺省设置）
- 2：详细信息（只为调试之用）

在混合面模型中使用 NRBCs

如果你想在混合面模型中使用 NRBCs，你必须定义混合分界面作为压力出口和

压力入口区域类型。

在并行 FLUENT 中使用 NRBCs

当 NRBCs 和并行解释器联合使用时，所有应用 NRBCs 的每个边界区域的单元必须位于或者包含在一个单一分区。你可以人为分区网格来确保（见 28.4.3 节更多信息指导什么作）

第十章　　湍流模型

本章主要介绍 **Fluent** 所使用的各种湍流模型及使用方法。

各小节的具体内容是：

10．1　　　简介
10．2　　　选择湍流模型
10．3　　　Spalart-Allmaras 模型
10．4　　　标准、**RNG** 和 **k-e** 相关模型
10．5　　　标准和 **SST k-**ω模型
10．6　　　雷诺兹压力模型
10．7　　　大型艾迪仿真模型
10．8　　　边界层湍流的近壁处理
10．9　　　湍流仿真模型的网格划分
10．10　　　湍流模型的问题提出
10．11　　　湍流模型问题的解决方法
10．12　　　湍流模型的后处理

10．1　简介

湍流出现在速度变动的地方。这种波动使得流体介质之间相互交换动量、能量和浓度变化，而且引起了数量的波动。由于这种波动是小尺度且是高频率的，所以在实际工程计算中直接模拟的话对计算机的要求会很高。实际上瞬时控制方程可能在时间上、空间上是均匀的，或者可以人为的改变尺度，这样修改后的方程耗费较少的计算机。但是，修改后的方程可能包含有我们所不知的变量，湍流模型需要用已知变量来确定这些变量。

FLUENT 提供了以下湍流模型：

- Spalart-Allmaras 模型
- k-e 模型
  - －标准 k-e 模型
  - －Renormalization-group (RNG) k-e模型
  - －带旋流修正k-e模型
- k-ω模型
  - －标准k-ω模型
  - －压力修正k-ω模型
  - －雷诺兹压力模型
  - －大漩涡模拟模型

10．2　选择一个湍流模型

不幸的是没有一个湍流模型对于所有的问题是通用的。选择模型时主要依靠以下几点：流体是否可压、建立特殊的可行的问题、精度的要求、计算机的能力、时间的限制。为了选择最好的模型，你需要了解不同条件的适用范围和限制

这一章的目的是给出在 FLUENT 中湍流模型的总的情况。我们将讨论单个模型对 cpu 和内存的要求。同时陈述一下一种模型对那些特定问题最适用，给出一般的指导方针以便对于你需要的给出湍流模型。

10．2．1　雷诺平均逼近 vs LES

在复杂形体的高雷诺数湍流中要求得精确的 N-S 方程的有关时间的解在近期内不太可能实现。两种可选择的方法用于把 N-S 方程不直接用于小尺度的模拟：雷诺平均和过滤。

两种方法都介绍了控制方程的附加条件，这些条件用于使模型封闭（封闭意味着有足够的方程来解所有的未知数。）

对于所有尺度的湍流模型，雷诺平均 N-S 方程只是传输平均的数量。找到一种可行的平均流动变量可以大大的减少计算机的工作量。如果平均流动是稳态的，那么控制方程就不必包含时间分量，并且稳态状态解决方法会更加有效。甚至在暂态过程中计算也是有利的，因为时间步长在平均流动中取决于全局的非稳态。雷诺平均逼近主要用于实际工程计算中，还有使用的模型比如 Spalart-Allmaras，k-e 系列，k-ω 系列和 RSM。

LES 提供了一种方式，让依靠时间尺度模拟的大边界计算问题可以利用一系列的过滤方程。对于解确切的 N-S 方程，过滤是一种必要的方法，用于改变比过滤法尺度小的边界,通常用于网格大小。和雷诺平均一样，过滤法加入了未知的变量，必须模拟出来以便方程能够封闭。

必须强调的是 LES 应用于工业的流产模拟还处于起步阶段。回顾近期的出版物，典型的方法已经用于简单的几何形体。这主要是因为解决含有能量的湍流漩涡需要大量的计算机资源。很多成功的 LES 模型已经用于高度空间的离散化，而且花了很多精力来解决尺度比惯性附属区域大的方面。在中间流中用 LES 降低精度的方法没有很多的资料。另外，用 LES 解决平板问题还需要进一步的证实。

作为一个一般性的介绍，在这里推荐一般的湍流模型用雷诺平均对于实际的计算是十分有用的。在 10.7 中将会详细介绍的 LES 逼近，对你十分有用，如果你的计算机能力很强大或者有意更新你的计算机的话。这一章余下的部分将会介绍选择雷诺平均逼近模型。

10．2．2　　雷诺平均

在雷诺平均中，在瞬态 N-S 方程中要求的变量已经分解位时均常量和变量。以速度为例：

$$u_i = \bar{u}_i + u_i^{'} \cdots\cdots\cdots (10.2-1)$$

这里 $\bar{u}_i$ 和 $u_i^{'}$ 时时均速度和波动分量。

相似的，像压力和其它的标量

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi_i^{'} \cdots\cdots\cdots (10.2-2)$$

这里 ϕ 表示一个标量如压力，动能，或粒子浓度。

用这种形式的表达式把流动的变量放入连续性方程和动量方程并且取一段一段时间的平均，这样可以写成一下的形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (10.2\text{-}3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i' u_j'}) \qquad (10.2\text{-}4)$$

方程 10.2-3 和 10.2-4 称为雷诺平均 N-S 方程。它和瞬态雷诺方程又相同的形式，速度和其它的变量表示成为了其时均形式。由于湍流造成的附加的条件现在表现出来了。这些雷诺压力， $-\rho\overline{u_i'u_j'}$ 必须被模拟出来以便使方程 10.2-4 封闭。

对于变密度的流体，方程 10.2-3 和 10.2-4 认为是 Favre 平均 N-S 方程，速度表示为了平均值。这样，方程 10.2-3 和 10.2-4 可以应用于变密度的流体。

10．2．3　Boussinesq 逼近 VS 雷诺压力转化模型

对于湍流模型，雷诺平均逼近要求在方程 10.2-4 的雷诺压力可以被精确的模拟。一般的方法利用 Boussinesq 假设把雷诺压力和平均速度梯度联系起来：

$$-\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \qquad (10.2\text{-}5)$$

Boussinesq假设使用在Spalart-Allmaras模型、*k-e*模型和*k-*ω 模型中。这种逼近方法好处是对计算机的要求不高。在Spalart-Allmaras模型中只有一个额外的方程要解。*k-e*模型和*k-*ω 模型中又两个方程要解。Boussinesq假设的不足之处是假设u_t是个等方性标量，这是不严格的。

可选的逼近，在 RSM 中，是用来解决在方程中的雷诺压力张量。另外要加一个方程。这就意味着在二维流场中要加五个方程，而在三维方程中要加七个方程。

在很多情况下基于 Boussinesq 假设的模型很好用，而且计算量并不是很大。但是 RSM 模型对于对层流有主要影响的各向异性湍流的状况十分适用。

10．2．4　The Spalart-Allmaras 模型

对于解决动力漩涡粘性，Spalart-Allmaras 模型是相对简单的方程。它包含了一组新的方程，在这些方程里不必要去计算和剪应力层厚度相关的长度尺度。Spalart-Allmaras 模型是设计用于航空领域的，主要是墙壁束缚流动，而且已经显示出和好的效果。在透平机械中的应用也愈加广泛。

在原始形式中 Spalart-Allmaras 模型对于低雷诺数模型是十分有效的，要求边界层中粘性影响的区域被适当的解决。在 FLUENT 中，Spalart-Allmaras 模型用在网格划分的不是很好时。这将是最好的选择，当精确的计算在湍流中并不是十分需要时。再有，在模型中近壁的变量梯度比在 *k-e* 模型和 *k-*ω 模型中的要小的多。这也许可以使模型对于数值的误差变得不敏感。想知道数值误差的具体情况请看 5.1.2。

需要注意的是 Spalart-Allmaras 模型是一种新出现的模型，现在不能断定它适用于所有的复杂的工程流体。例如，不能依靠它去预测均匀衰退，各向同性湍流。还有要注意的是，单方程的模型经常因为对长度的不敏感而受到批评，例如当流动墙壁束缚变为自由剪切流。

10．2．5　标准*k-e*模型

最简单的完整湍流模型是两个方程的模型，要解两个变量，速度和长度尺度。在FLUENT中，标准*k-e*模型自从被Launder and Spalding提出之后，就变成工程流场计算中主要的工具了。适用范围广、经济、合理的精度，这就是为什么它在工业流场和热交换模拟中有如此广泛的应用了。它是个半经验的公式，是从实验现象中总结出来的。

由于人们已经知道了*k-e*模型适用的范围，因此人们对它加以改造，出现了RNG *k-e*模型和带旋流修正*k-e*模型

10．2．6　RNG *k-e*模型

RNG *k-e*模型来源于严格的统计技术。它和标准*k-e*模型很相似，但是有以下改进：

- RNG模型在e方程中加了一个条件，有效的改善了精度。
- 考虑到了湍流漩涡，提高了在这方面的精度。

• RNG理论为湍流Prandtl数提供了一个解析公式，然而标准*k-e*模型使用的是用户提供的常数。

•然而标准*k-e*模型是一种高雷诺数的模型，RNG理论提供了一个考虑低雷诺数流动粘性的解析公式。这些公式的效用依靠正确的对待近壁区域

这些特点使得RNG *k-e*模型比标准*k-e*模型在更广泛的流动中有更高的可信度和精度。

10．2．7　带旋流修正的 *k-e*模型

带旋流修正的 *k-e* 模型是近期才出现的，比起标准 *k-e* 模型来有两个主要的不同点。

• 带旋流修正的 *k-e* 模型为湍流粘性增加了一个公式。

•为耗散率增加了新的传输方程，这个方程来源于一个为层流速度波动而作的精确方程

术语“realizable”，意味着模型要确保在雷诺压力中要有数学约束，湍流的连续性。

带旋流修正的 *k-e* 模型直接的好处是对于平板和圆柱射流的发散比率的更精确的预测。而且它对于旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流有很好的表现。

带旋流修正的 *k-e* 模型和 RNG *k-e* 模型都显现出比标准 *k-e* 模型在强流线弯曲、漩涡和旋转有更好的表现。由于带旋流修正的 *k-e* 模型是新出现的模型，所以现在还没有确凿的证据表明它比 RNG *k-e* 模型有更好的表现。但是最初的研究表明带旋流修正的 *k-e* 模型在所有 *k-e* 模型中流动分离和复杂二次流有很好的作用。

带旋流修正的 *k-e* 模型的一个不足是在主要计算旋转和静态流动区域时不能提供自然的湍流粘度。这是因为带旋流修正的 *k-e* 模型在定义湍流粘度时考虑了平均旋度的影响。这种额外的旋转影响已经在单一旋转参考系中得到证实，而且表现要好于标准 *k-e* 模型。由于这些修改，把它应用于多重参考系统中需要注意。

10．2．8　标准 *k-*ω模型

标准*k-*ω模型是基于Wilcox *k-*ω模型，它是为考虑**低雷诺数、可压缩性和剪切流**传播而修改的。Wilcox *k-*ω模型预测了自由剪切流传播速率，像尾流、混合流动、平板绕流、圆柱绕流和放射状喷射，因而可以应用于墙壁束缚流动和自由剪切流动。标准*k-e*模型的一个变形是SST *k-*ω模型，它在FLUENT中也是可用的，将在10.2.9中介绍它。

10．2．9　剪切压力传输（SST） *k-*ω模型

SST *k-*ω模型由Menter发展，以便使得在广泛的领域中可以独立于*k-e*模型，使得在近壁自由流中*k-*ω模型有广泛的应用范围和精度。为了达到此目的，*k-e*模型变成了*k-*ω公式。SST *k-*ω模型和标准*k-*ω模型相似，但有以下改进：

• SST *k-*ω模型和*k-e*模型的变形增长于混合功能和双模型加在一起。混合功能是为近壁区域设计的，这个区域对标准*k-*ω模型有效，还有自由表面，这对*k-e*模型的变形有效。

• SST *k-*ω模型合并了来源于ω方程中的交叉扩散。

• 湍流粘度考虑到了湍流剪应力的传波。

• 模型常量不同

这些改进使得SST *k-*ω模型比标准*k-*ω模型在在广泛的流动领域中有更高的精度和可信度。

10．2．10　雷诺压力模型（RSM）

在FLUENT中RSM是最精细制作的模型。放弃等方性边界速度假设，RSM使得雷诺平均N-S方程封闭，解决了关于方程中的雷诺压力，还有耗散速率。这意味这在二维流动中加入了四个方程，而在三维流动中加入了七个方程。

由于RSM比单方程和双方程模型更加严格的考虑了流线型弯曲、漩涡、旋转和张力快速变化，它对于复杂流动有更高的精度预测的潜力。但是这种预测仅仅限于与雷诺压力有关的方程。压力张力和耗散速率被认为是使RSM模型预测精度降低的主要因素。

RSM模型并不总是因为比简单模型好而花费更多的计算机资源。但是要考虑雷诺压力的

各向异性时，必须用RSM模型。例如飓风流动、燃烧室高速旋转流、管道中二次流。

10．2．11　计算成效：cpu时间和解决方案

从计算的角度看Spalart-Allmaras模型在FLUENT中是最经济的湍流模型，虽然只有一种方程可以解。由于要解额外的方程，标准*k-e*模型比Spalart-Allmaras模型耗费更多的计算机资源。带旋流修正的*k-e*模型比标准*k-e*模型稍微多一点。由于控制方程中额外的功能和非线性，RNG*k-e*模型比标准*k-e*模型多消耗10～15%的CPU时间。就像*k-e*模型，*k-*ω模型也是两个方程的模型，所以计算时间相同。

比较一下*k-e*模型和*k-*ω模型，RSM模型因为考虑了雷诺压力而需要更多的CPU时间。然而高效的程序大大的节约了CPU时间。RSM模型比*k-e*模型和*k-*ω模型要多耗费50～60%的CPU时间，还有15～20%的内存。

除了时间，湍流模型的选择也影响FLUENT的计算。比如标准*k-e*模型是专为轻微的扩散设计的，然而RNG *k-e*模型是为高张力引起的湍流粘度降低而设计的。这就是RNG模型的缺点。

同样的，RSM模型需要比*k-e*模型和*k-*ω模型更多的时间因为它要联合雷诺压力和层流。

10．3　*Spalart-Allmaras* 模型

在湍流模型中利用Boussinesq逼近，中心问题是怎样计算漩涡粘度。这个模型被Spalart and Allmaras提出，用来解决因湍流动粘滞率而修改的数量方程。

10.3.1 *Spalart-AllmarasI*模型的偏微方程

*Spalart-AllmarasI*模型的变量中$\tilde{v}$是湍流动粘滞率除了近壁区域，方程是：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) =$$

$$G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu+\rho\tilde{\nu})\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right\} + C_{b2}\rho\left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right)^2\right] - Y_\nu + S_{\tilde{\nu}} \quad (10.3\text{-}1)$$

这里G_v是湍流粘度生成的，Y_v是被湍流粘度消去，发生在近壁区域。*S*~是用户定义的。注意到湍流动能在Spalart-Allmaras没有被计算，但估计雷诺压力时没有被考虑。

10.3.2　湍流粘度的建模

湍流粘度u_t由以下公式计算：

$$\mu_t = \rho\tilde{\nu}f_{v1} \quad (10.3\text{-}2)$$

f_{v1}由下式：

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3} \quad (10.3\text{-}3)$$

并且

$$\chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (10.3\text{-}4)$$

10.3.3　湍流生产的建模

G_v由下式

$$G_\nu = C_{b1}\rho\tilde{S}\tilde{\nu} \quad (10.3\text{-}5)$$

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2} \qquad (10.3\text{-}6)$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} \qquad (10.3\text{-}7)$$

C_{b1}和k是常数，d是离墙的距离，S是变形张量。在FLUENT中，S由下式给出：

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \qquad (10.3\text{-}8)$$

这里Ω_{ij}是层流旋转张量，由下式定义：

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (10.3\text{-}9)$$

当模型给出时，我们最感兴趣的是墙壁束缚流动中S表达式的修正，湍流旋涡只发生在近壁。但是，我们知道要把湍流产生的平均应变考虑进去，并且按照建议改变模型。

这种修改包括旋度和应变，在S中定义：

$$S \equiv |\Omega_{ij}| + C_{\text{prod}} \ \min\left(0, |S_{ij}| - |\Omega_{ij}|\right) \qquad (10.3\text{-}10)$$

$$C_{\text{prod}} = 2.0, \quad |\Omega_{ij}| \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \quad |S_{ij}| \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

在平均应变率中S_{ij}定义为：

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \qquad (10.3\text{-}11)$$

包括旋度和应变张量减少了漩涡粘度从而减少了漩涡粘度本身。这样的例子可以在漩涡流动中找到。旋度和应变张量更多正确的考虑湍流旋度。一般的方法是预测漩涡粘度的产生并且预测漩涡粘度本身。

你可以选择模型，在Viscous Model面板。

10.3.4 湍流消失的建模

消失的模型是：

$$Y_\nu = C_{w1}\rho f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2 \qquad (10.3\text{-}12)$$

$$f_w = g\left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6}\right]^{1/6} \qquad (10.3\text{-}13)$$

$$g = r + C_{w2}\left(r^6 - r\right) \qquad (10.3\text{-}14)$$

$$r \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S}\kappa^2 d^2} \qquad (10.3\text{-}15)$$

C_{w1}、C_{w2}和C_{w3}是常量，$\tilde{S}$ 由方程10.3-6给出。注意到考虑大平均应力而修改的S也会影响用 $\tilde{S}$ 去计算r。

10.3.5 模型常量

模型常量包括 $C_{b1}, C_{b2}, \sigma_{\tilde{\nu}}, C_{v1}, C_{w1}, C_{w2}, C_{w3}$, 和k,下面是它们的值：

$$C_{b1} = 0.1335, \quad C_{b2} = 0.622, \quad \sigma_{\tilde{\nu}} = \frac{2}{3}, \quad C_{v1} = 7.1$$

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma_{\tilde{\nu}}}, \quad C_{w2} = 0.3, \quad C_{w3} = 2.0, \quad \kappa = 0.4187$$

10.3.6 墙壁边界条件

在墙壁上，修改后的湍流动粘度，$\tilde{V}$，被认为是0。当网格划分的较好可以解决层状亚层，壁面剪应力可以由下面的关系式得出：

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \qquad (10.3\text{-}16)$$

如果网格太粗糙不足以解决，那么就假设

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln E \left(\frac{\rho u_\tau y}{\mu} \right) \qquad (10.3\text{-}17)$$

这里u是平行于壁面的速度，u_r是切速度，y是离墙壁的距离，k是von Karman 常量E＝9.793。

10.3.6 热对流和质量转移模型

在FLUENT中，湍流热交换使用的是对湍流动能交换的雷诺分析，能量方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{\text{eff}}\right] + S_h \qquad (10.3\text{-}18)$$

k是导热系数，E是总能，$T_{(ij)\,ef}$是偏应力张量：

$$(\tau_{ij})_{\text{eff}} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3}\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

$T_{(ij)\,ef}$考虑到了由于粘性而产生的热，并且总是联合方程中。它在不能单个中解出，但是可

以在粘性模型面板中找到。默认的湍流Prandtl数是0.85，你可以在粘性模型面板中改变它。
湍流物质交换可以按照相似的方法，Schmidt数是0.7，可以在粘性模型面板中改变它。
标量的墙壁边界条件可以类似于动量，可以用墙壁法则。

10.4 标准、RNG和带旋流修正k-e模型

这一章讲述标准、RNG和带旋流修正k-e模型这三种模型有相似的形式，有k方程和e方程，它们主要的不同点是：

- 计算湍流粘性的方法
- 湍流Prandtl数由k和e方程的湍流扩散决定
- 在e方程中湍流的产生和消失

每个模型计算湍流粘性的方法和模型的常数不一样。但从本质上它们在其它方面是一样的。

10.4.1 标准 k-e 模型

标准 k-e 模型是个半经验公式，主要是基于湍流动能和扩散率。k方程是个精确方程，e方程是个由经验公式导出的方程。

k-e 模型假定流场完全是湍流，分之之间的粘性可以忽略。标准 k-e 模型因而只对完全是湍流的流场有效。

标准 k-e 模型的方程

湍流动能方程k，和扩散方程e：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \quad (10.4\text{-}1)$$

and

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}\left(G_k + C_{3\epsilon}G_b\right) - C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (10.4\text{-}2)$$

方程中G_k表示由层流速度梯度而产生的湍流动能，计算方法在10.4.4中有介绍。G_b是由浮力产生的湍流动能，10.4.5中有介绍，Y_M由于在可压缩湍流中，过渡的扩散产生的波动，10.4.6中有介绍，C_1，C_2，C_3，是常量，σ_k和σ_e是k方程和e方程的湍流Prandtl数，S_k和S_e是用户定义的。

湍流速度模型

湍流速度u_t由下式确定

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10.4\text{-}3)$$

C_u是常量

模型常量

$$C_{1\epsilon} = 1.44,\quad C_{2\epsilon} = 1.92,\quad C_\mu = 0.09,\quad \sigma_k = 1.0,\quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

这些常量是从试验中得来的，包括空气、水的基本湍流。他们已经发现了怎样很好的处理墙壁束缚和自由剪切流。

虽然这些常量对于大多数情况是适用的，你还是可以在粘性模型面板中来改变它们。

10.4.2 RNG k-e 模型

RNG k-e 模型是从暂态N-S方程中推出的，使用了一种叫“renormalization group”的数学方法。解析性是由它直接从标准k-e 模型变来，还有其它的一些功能。对于RNG k-e 模型更全面的叙述可以在36面找到。

RNG k-e 模型的方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{\mathrm{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \tag{10.4-4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\epsilon \mu_{\mathrm{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}\left(G_k + C_{3\epsilon}G_b\right) - C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \tag{10.4-5}$$

G_k是由层流速度梯度而产生的湍流动能，10.4.4介绍了计算方法，G_b是由浮力而产生的湍流动能，10.4.5介绍了计算方法，Y_M由于在可压缩湍流中，过渡的扩散产生的波动，10.4.6中有介绍，C_1，C_2，C_3，是常量，a_k和a_e是k方程和e方程的湍流Prandtl数，S_k和S_e是用户定义的。

有效速度模型

在RNG中消除尺度的过程由以下方程：

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon\mu}}\right) = 1.72\frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}}d\hat{\nu} \tag{10.4-6}$$

$$\hat{\nu} = \mu_{\mathrm{eff}}/\mu$$
$$C_\nu \approx 100$$

方程10.4-6是一个完整的的方程，从中可以得到湍流变量怎样影响雷诺数，使得模型对低雷诺数和近壁流有更好的表现。

在大雷诺数限制下方程10.4-6得出

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{10.4-7}$$

C_u＝0.0845，来自RNG理论。有趣的是这个值和标准准k-e模型总的0.09很接近。

在FLUENT中粘性的影响使用在方程10.4-7的大雷诺数形式。当然当你要计算低雷诺数是可以直接使用10.4-6给出的方程。

RNG模型的漩涡修改

湍流在层流中受到漩涡得影响。FLUENT通过修改湍流粘度来修正这些影响。有以下形式：

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\epsilon}\right) \tag{10.4-8}$$

这里u_{t0}是方程10.4-6或方程10.4-7中没有修正得量。Ω是在FLUENT中考虑漩涡而估计的一个量，a_s是一个常量，取决于流动主要是漩涡还是适度的漩涡。在选择RNG模型时这些修改主

要在轴对称、漩涡流、和三维流动中。对于适度的漩涡流动，a_s＝0.05而且不能修改。对于强漩涡流动，可以选择更大的值。

计算Prandtl的反面影响

Prandtl数的反面影响a_k和a_e由以下公式计算：

$$\left|\frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929}\right|^{0.6321}\left|\frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929}\right|^{0.3679} = \frac{\mu_{\rm mol}}{\mu_{\rm eff}} \qquad (10.4\text{-}9)$$

这里a_0＝1.0，在大雷诺数限，a_k=a_e≈1.393

e方程中的R_e

RNG和标准k-e模型的区别在于：

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}\frac{\epsilon^2}{k} \qquad (10.4\text{-}10)$$

这里 $\eta \equiv Sk/\epsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$.

这一项的影响可以通过重新排列方程清楚的看出。利用方程10.4-10,方程10.4-5的三四项可以合并，方程可以写成：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\epsilon \mu_{\rm eff}\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}(G_k + C_{3\epsilon}G_b) - C^*_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k} \qquad (10.4\text{-}11)$$

这里C_{2e}^*由下式给出

$$C^*_{2\epsilon} \equiv C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3} \qquad (10.4\text{-}12)$$

当$\eta < \eta_0$，R项为正，C_{2e}^*要大于C_{2e}。按照对数，$\eta \approx 3.0$，给定$C_{2e}^* \approx 2.0$，这和标准k-e模型中的C_{2e}十分接近。结果，对于适度的应力流，RNG模型算出的结果要大于标准k-e模型。

当$\eta > \eta_0$，R项为负，使C_{2e}^*要小于C_{2e}。和标准k-e模型相比较，e变大而k变小，最终影响到粘性。结果在rapidly strained流中，RNG模型产生的湍流粘度要低于标准k-e模型。

因而，RNG模型相比于标准k-e模型对瞬变流和流线弯曲的影响能作出更好的反应，这也可以解释RNG模型在某类流动中有很好的表现。

模型常量

在方程10.4-5的模型常量C_{1e}和C_{2e}由RNG理论分析得出。这些值在FLUENT是默认的，

$$C_{1\epsilon} = 1.42, \quad C_{2\epsilon} = 1.68$$

10.4.3 带旋流修正k-e模型

作为对k-e模型和RNG模型的补充，在FLUENT中还提供了一种叫带旋流修正k-e模型。“realizable”表示模型满足某种数学约束，和湍流的物理模型是一致的。为了理解这一点，

考虑一下Boussinesq关系式和漩涡粘性的定义，这样可以得到正常雷诺压力下可压缩流动层流方程表达式：

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2\,\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \qquad (10.4\text{-}13)$$

利用方程10.4-3可以得到一个结果，*u*2,本来定义为正的数变成了负数。当应力大到足以满足

$$\frac{k}{\epsilon}\frac{\partial U}{\partial x} > \frac{1}{3C_\mu} \approx 3.7 \qquad (10.4\text{-}14)$$

同样在Schwarz不等式中当层流应力大于它，那么不等式将不会成立。最直接的方法保证可实现是使变量C_u对于层流和湍流敏感。C_u由很多模型采用，而且被证实很有效。例如C_u在不活泼的边界层中为0.09，在剪切流中为0.05。

标准k-e模型和其它的传统k-e模型的另外一个弱点是扩散方程。有名的圆柱绕流佯谬，就归结于这一点。

带旋流修正的k-e模型由Shih提出，作出如下改进

- 改进的漩涡粘度
- 为扩散作出新的方程

带旋流修正k-e模型的方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \qquad (10.4\text{-}15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + \rho\, C_1 S\epsilon - \rho\, C_2\frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu\epsilon}} + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}C_{3\epsilon}G_b + S_\epsilon \qquad (10.4\text{-}16)$$

$$C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right]$$

$$\eta = S\frac{k}{\epsilon}$$

在方程中，G_k是由层流速度梯度而产生的湍流动能，10.4.4介绍了计算方法，G_b是由浮力而

产生的湍流动能，10.4.5介绍了计算方法，Y_M由于在可压缩湍流中，过渡的扩散产生的波动，10.4.6中有介绍， C_2，C_{1e}是常量，σ_k和σ_e是k方程和e方程的湍流Prandtl数，S_k和S_e是用户定义的。

注意到这里的k方程和标准k-e模型和RNG模型的k方程是一样的，常量除外。然而e方程确实大不相同。一个值得注意的问题是在e方程中产生的一项并不包含在k方程中。比如它并不包含相同的G_k项，在其它的k-e模型中。人们相信现在的形式更好的表示了光谱的能量转换。另一个值得注意的是消去项没有任何奇点。比如它的分母不为零甚至k为零或者小于零。这和原始的有一个奇点的k-e模型相比，归咎于分母中的k。

这个模型对于和广泛的的流动有效，包括旋转均匀剪切流，自由流中包括喷射和混合流，管道和边界流，还有分离流。由于这些原因，这种模型比标准k-e模型要好。尤其需要注意的是这种模型可以解决圆柱射流。比如，它预测了轴对称射流的传播速率，和平板射流一样。

湍流速率模型

像其它的k-e模型一样，漩涡粘度由下式计算：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \qquad (10.4\text{-}17)$$

带旋流修正k-e模型与标准k-e模型和RNG k-e模型的区别在于C_u不再是常量了，它由下式计算：

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\epsilon}} \qquad (10.4\text{-}18)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \qquad (10.4\text{-}19)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk}\omega_k$$
$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \epsilon_{ijk}\omega_k$$

这里 $\overline{\Omega_{ij}}$ 是在柱坐标下的带有角速度的 ω_k 层流旋度，模型常量A_0为：

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6}\cos\phi$$

$$\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$$

可以看出，C_u是层流应变和旋度的函数，系统旋转的角速度，和湍流范围。方程10.4-17中的C_u可以看作是对惯性层流的标准值0.09在平衡边界层的重新计算。

模型常量

模型常量C_2，σ$_k$，和σ$_e$已经为某种规范流做过优化。模型常量是:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.2$$

10.4.4 k-e模型中的模型湍流产生

在G_k项中，表现了湍流动能的产生，是按照标准，RNG，带旋流修正k-e模型而做的，从精确的k方程这项可以定义为：

$$G_k = -\rho\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \qquad (10.4\text{-}20)$$

为了评估G_k和Boussinesq假设

$$G_k = \mu_t S^2 \qquad (10.4\text{-}21)$$

S是系数，定义为

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \qquad (10.4\text{-}22)$$

10.4.5 k-e模型中湍流浮力的影响k-e模型

当重力和温度要出现在模拟中，FLUENT中k-e模型在k方程中考虑到了浮力的影响，相应的也在e方程中考虑了。

浮力由下式给出：

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\frac{\partial T}{\partial x_i} \qquad (10.4\text{-}23)$$

这里 Prt 是湍流能量普朗特数，g_i是重力在 i 方向上的分量。对于标准和带旋流修正 k-e 模型，Prt的默认值是0.85。在RNG模型，里Pr_t＝1/a，这里a是由方程10.4-9确定的，但是a_0＝1/Pr＝k/uc_p。热膨胀系数，β，定义为：

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \qquad (10.4\text{-}24)$$

对于理想气体方程10.4-23减为

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \qquad (10.4\text{-}25)$$

从k方程中可以看出湍流动能趋向增长在不稳定层中。对于稳定层，浮力倾向与抑制湍流。在FLUENT中，当你包括了重力和温度时，浮力的影响总会被包括。当然浮力对于k的影响相对来讲比较清楚，而对e方程就不是十分清楚了。

然而你可以包含浮力对e方程的影响，在粘性模型面板中。因此在方程10.4-25中给定的G_b的值用在e方程中。

E方程受浮力影响的程度取决与常数C_{3e}，由下式计算：

$$C_{3\epsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right| \qquad (10.4\text{-}26)$$

这里v是流体平行与重力的速度分量，u是垂直于重力的分量。这样的话，C_{3e}将会是1，对于速度方向和重力相同的层流。对于浮力应力层它是垂直重力速度，C_{3e}将会变成零。

10.4.6　k－e模型中可压缩性的影响

对于高Mach数流可压缩性通过扩张扩散影响湍流，这往往被不可压缩流忽略。对于可压缩流，忽略扩张扩散的影响是的预测观察增加Mach数时扩散速度的减少和其他的自由剪切层失败的原因。在FLUENT中，为了考虑这对k－e模型的影响扩张扩散项，Y_M被写进了k方程。这项是由Sarkar提出：

$$Y_M = 2\rho\epsilon \mathrm{M}_t^2 \qquad (10.4\text{-}27)$$

这里M_t是湍流Mach数：

$$\mathrm{M}_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \qquad (10.4\text{-}28)$$

这里a是声速。

这种可压缩性的修正总是起作用理想气体的压缩形式被使用时。

10.4.7　在k－e模型中证明热和物质交换模型。

在FLUENT中，湍流的热交换使用一种叫做雷诺模拟的方法来比作湍流动量交换。修改后的能量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_{\mathrm{eff}}\frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}}\right) + S_h \quad (10.4\text{-}29)$$

这里E时总能，k_{eff}是热传导系数，$(T_{ij})_{eff}$是deviatoric压力张量：

$$(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}} = \mu_{\mathrm{eff}}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) - \frac{2}{3}\mu_{\mathrm{eff}}\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\delta_{ij}$$

含有$(T_{ij})_{eff}$项表明粘性热量，总是要联立方程求解。在单个方程中计算不了，但可以通过

粘性模型面板来激活。

增加的项可能出现在能量方程中，这取决于你所用的物理模型。想知道细节可以看11.2.1章节。对于标准和带旋流修正k－e模型热传导系数为：

$$k_{\rm eff} = \alpha c_p \mu_{\rm eff}$$

这里a由方程10.4-9算出，a_0＝1/Pr＝k/uc_p。

实际上a随着umol/ueff_而变就像在方程10.4-9中，这是RNG模型的优点。这和试验相吻合：湍流能量普朗特数随着分子Prandtl数和湍流变化。方程10.4-9的有效范围很广，从分子Prandtl数在液体的10^{-2}到石蜡的10^3，这样使得热传导可以在低雷诺数中计算。方程10.4-9平稳的预测了有效的湍流能量普朗特数，从粘性占主要地位的区域的a＝1/Pr到完全湍流区域的a＝1.393。对于湍流物质交换同样对待，对于标准和带旋流修正k－e模型，默认的Schmidt数是0.7。可以在粘性模型面板中改变。对于RNG模型，有效的湍流物质交换扩散率用一种热交换的计算方法计算。方程10.4-9的a_0＝1/Sc，这里Sc是molecular数。

10.5 标准和SST k-ω模型

这一章讲述标准和SST k-ω模型。俩种模型有相似的形式，有方程k和ω。SST和标准模型的不同之处是

- 从边界层内部的标准k-ω模型到边界层外部的高雷诺数的k－e模型的逐渐转变
- 考虑到湍流剪应力的影响修改了湍流粘性公式

10.5 标准k-ω模型

标准k-ω模型是一种经验模型，是基于湍流能量方程和扩散速率方程。

由于k-ω模型已经修改多年，k方程和ω方程都增加了项，这样增加了模型的精度

标准k-ω模型的方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k + S_k \qquad (10.5\text{-}1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \qquad (10.5\text{-}2)$$

在方程中，G_k是由层流速度梯度而产生的湍流动能。G_ω是由ω方程产生的。T_k和T_ω表明了k和ω的扩散率。Y_k和Y_ω由于扩散产生的湍流。，所有的上面提及的项下面都有介绍。S_k和S_e是用户定义的。

模型扩散的影响

对k-ω模型，扩散的影响：

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \qquad (10.5\text{-}3)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \qquad (10.5\text{-}4)$$

这里σ_k和σ_ω是k、ω方程的湍流能量普朗特数。湍流粘度u_t:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \qquad (10.5\text{-}5)$$

低雷诺数修正

系数a*使得湍流粘度产生低雷诺数修正。公式如下：

$$\alpha^* = \alpha^*_\infty \left(\frac{\alpha^*_0 + \mathrm{Re}_t/R_k}{1 + \mathrm{Re}_t/R_k} \right) \qquad (10.5\text{-}6)$$

这里

$$\mathrm{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \qquad (10.5\text{-}7)$$

湍流模型：

k 的定义：

G_k 表示湍流的动能。其表达式如下：

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \qquad (10.5\text{-}11)$$

为计算方便，Boussinesq 假设：

$$G_k = \mu_t S^2 \qquad (10.5\text{-}12)$$

S 为表面张力系数。

ω 的定义：

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \qquad (10.5\text{-}13)$$

系数∂如下定义：

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + \mathrm{Re}_t/R_\omega}{1 + \mathrm{Re}_t/R_\omega} \right) \qquad (10.5\text{-}14)$$

其中 R_ω =2.95，注意，在高雷诺数的 K-ω 模型中， $\alpha = \alpha_\infty = 1.$

湍流分离模型：

K 的分离：

其公式为：

$$Y_k = \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \qquad (10.5\text{-}15)$$

其中

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \chi_k \le 0 \\ \frac{1+680\chi_k^2}{1+400\chi_k^2} & \chi_k > 0 \end{cases} \qquad (10.5\text{-}16)$$

其中：

$$\chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \qquad (10.5\text{-}17)$$

$$\beta^* = \beta_i^* \left[1 + \zeta^* F(\mathrm{M}_t)\right] \qquad (10.5\text{-}18)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/15 + (\mathrm{Re}_t/R_\beta)^4}{1 + (\mathrm{Re}_t/R_\beta)^4}\right) \qquad (10.5\text{-}19)$$

$$\zeta^* = 1.5 \qquad (10.5\text{-}20)$$

$$R_\beta = 8 \qquad (10.5\text{-}21)$$

$$\beta_\infty^* = 0.09 \qquad (10.5\text{-}22)$$

其中，Re_t由 10.5-7 的公式给出

ω的分离：

其公式为：

$$Y_\omega = \rho\,\beta\,f_\beta\,\omega^2 \qquad (10.5\text{-}23)$$

其中：

$$f_\beta = \frac{1 + 70\chi_\omega}{1 + 80\chi_\omega} \qquad (10.5\text{-}24)$$

$$\chi_\omega = \left|\frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_\infty^*\omega)^3}\right| \qquad (10.5\text{-}25)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (10.5\text{-}26)$$

S_{ij}由 10.3-11 给出：

$$\beta = \beta_i\left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i}\zeta^* F(\mathrm{M}_t)\right] \qquad (10.5\text{-}27)$$

β_i^*和$F(\mathrm{M}_t)$分别由 10.5-9,10.5-10 给出

对可压缩性修正

$F(\mathrm{M}_t)$公式如下：

$$F(\mathrm{M}_t) = \begin{cases} 0 & \mathrm{M}_t \le \mathrm{M}_{t0} \\ \mathrm{M}_t^2 - \mathrm{M}_{t0}^2 & \mathrm{M}_t > \mathrm{M}_{t0} \end{cases} \qquad (10.5\text{-}28)$$

其中：

$$\mathrm{M}_t^2 \equiv \frac{2k}{a^2} \qquad (10.5\text{-}29)$$

$$\mathrm{M}_{t0} = 0.25 \qquad (10.5\text{-}30)$$

$$a = \sqrt{\gamma R T} \qquad (10.5\text{-}31)$$

注意，在高雷诺数的 K-ω 模型中，$\beta_i^* = \beta_\infty^*$.,在不可压缩的公式中，$\beta^* = \beta_i^*$.

模型的常数项：

$$\alpha_\infty^* = 1,\ \ \alpha_\infty = 0.52,\ \ \alpha_0 = \frac{1}{9},\ \ \beta_\infty^* = 0.09,\ \ \beta_i = 0.072,\ \ R_\beta = 8$$

$$R_k = 6,\ \ R_\omega = 2.95,\ \ \zeta^* = 1.5,\ \ \mathrm{M}_{t0} = 0.25,\ \ \sigma_k = 2.0,\ \ \sigma_\omega = 2.0$$

边界条件：

在 K-ω 模型中，K 表达式的边界处理方法同强化处理法一样，既壁面网格方程的边界条件相应的有边界方程得到，对于理想的网格划分，将得到的雷诺数的边界层条件：

在 FLUENT 中，壁面ω 值由以下方程得到：

$$\omega_w = \frac{\rho (u^*)^2}{\mu} \omega^+ \qquad (10.5\text{-}32)$$

对于薄壁面，ω^+值由一下方程得出：

$$\omega^+ = \min\left(\omega_w^+, \frac{6}{\beta_\infty^* (y^+)^2}\right) \qquad (10.5\text{-}33)$$

其中：

$$\omega_w^+ = \begin{cases} \left(\frac{50}{k_s^+}\right)^2 & k_s^+ < 25 \\ \frac{100}{k_s^+} & k_s^+ \ge 25 \end{cases} \qquad (10.5\text{-}34)$$

其中：

$$k_s^+ = \max\left(1.0, \frac{\rho k_s u^*}{\mu}\right) \qquad (10.5\text{-}35)$$

ks 试一个近似值。

在对流区或湍流区，ω^+ 的值为：

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{\mathrm{turb}}^+}{dy^+} \qquad (10.5\text{-}36)$$

从而，壁面的ω 的方程为：

$$\omega = \frac{u^*}{\sqrt{\beta^*_\infty}\kappa y} \qquad (10.5\text{-}37)$$

注意，对于缓流区的壁面网格ω值,FLUENT将区对流区与缓流区中间的值。

10．5-2　SSTK-ω模型

FLUENT还提供了SST模型。它更适合对流减压区的计算。另外它还考虑了正交发散项从而使方程在近壁面和远壁面都适合

SST K-ω流动方程：

其方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k + S_k \qquad (10.5\text{-}38)$$

和

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (10.5\text{-}39)$$

方程中，G_k表示湍流的动能，G_ω为ω方程，Γ_k，Γ_ω分别代表k与ω的有效扩散项

Y_k，Y_ω分别代表k与ω的发散项。D_ω代表正交发散项。S_k与S_ω用户自定义。

有效扩散项方程：

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \qquad (10.5\text{-}40)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \qquad (10.5\text{-}41)$$

其中σ_k σ_ω分别代表k与ω的湍流普朗特l数，湍流粘性系数计算如下：

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{\Omega F_2}{a_1 \omega}\right]} \qquad (10.5\text{-}42)$$

其中：

$$\Omega \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \qquad (10.5\text{-}43)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_1)/\sigma_{k,2}} \qquad (10.5\text{-}44)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}} \qquad (10.5\text{-}45)$$

Ω_{ij}为旋率，α^* 见公式10。5-6，F_1和F_2,定义如下

$$F_1 = \tanh\left(\Phi_1^4\right) \qquad (10.5\text{-}46)$$

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2\omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2}D_\omega^+ y^2}\right] \quad (10.5\text{-}47)$$

$$D_\omega^+ = \max\left[2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega,2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20}\right] \quad (10.5\text{-}48)$$

$$F_2 = \tanh\left(\Phi_2^2\right) \quad (10.5\text{-}49)$$

$$\Phi_2 = \max\left[2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2\omega}\right] \quad (10.5\text{-}50)$$

其中y为到另一个面的距离。D_ω^+ 为正交扩散项的正方向。

湍流产生模型：

K项与标准K-ω 模型相同。

ω 项：

G_ω 代表 ω 方程，定义为

$$G_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t}G_k \quad (10.5\text{-}51)$$

注意，这个公式与标准K-ω 模型不同，区别在于标准K-ω 中，α_∞ 为一常数

而SST模型中，α_∞ 方程如下：

$$\alpha_\infty = F_1\alpha_{\infty,1} + (1-F_1)\alpha_{\infty,2} \quad (10.5\text{-}52)$$

其中：

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{w,1}\sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (10.5\text{-}53)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{w,2}\sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (10.5\text{-}54)$$

K=0.41，$\beta_{i,1}$，$\beta_{i,2}$ 分别由下面的方程给出

湍流发散模型：

K的发散项：

Y_k 代表湍流动能的发散，与标准K-ω 模型类似，不同在于标准K-ω 模型中，f_{β^*} 为一分

段函数，而在SST模型中，f_{β^*} 为常数1，从而

$$Y_k = \rho\beta^* k\omega \quad (10.5\text{-}55)$$

ω 发散项

Y_ω 代表 ω 的发散项，定义类似标准K-ω 模型，不同在于标准K-ω 中 β_i 为常数，f_β 定义见

公式10.5-24，SST模型f_β为常数1，因此，

$$Y_k = \rho\beta\omega^2 \qquad (10.5\text{-}56)$$

β_i定义如下：

$$\beta_i = F_1\beta_{i,1} + (1-F_1)\beta_{i,2} \qquad (10.5\text{-}57)$$

其中：

$$\beta_{i,1} = 0.075 \qquad (10.5\text{-}58)$$
$$\beta_{i,2} = 0.0828 \qquad (10.5\text{-}59)$$

F_1由方程10.5-46得到

正交发散项修正：

SST模型建立在标准K-ω模型和标准K-ε模型基础上。综合考虑，得到正交发散项D_ω。其方程为：

$$D_\omega = 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega,2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \qquad (10.5\text{-}60)$$

模型的常数：

$$\sigma_{k,1} = 1.176,\ \ \sigma_{\omega,1} = 2.0,\ \ \sigma_{k,2} = 1.0,\ \ \sigma_{\omega,2} = 1.168$$
$$a_1 = 0.31,\ \ \beta_{i,1} = 0.075\ \ \beta_{i,2} = 0.0828$$

其他的常数与标准K-ω模型的相同。

10．6 雷诺应力模型

雷诺应力模型包括用不同的流动方程计算雷诺压力，$\overline{u_i'u_j'}$，从而封闭的动量方程组，准确的雷诺压力流动方程要从准确的动量方程中得到，其方法是，在动量方程中乘以一个合适的波动系数，从而得到雷诺平均数，但是在方程中还有几项不能确定，必须做一些假设，使方程封闭。这一章，将介绍RSM及其假设

10．6-1 雷诺应力流动方程：

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\,\overline{u_i'u_j'})}_{\text{Local Time Derivative}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u_i'u_j'})}_{C_{ij}\equiv \text{Convection}} =$$

$$\underbrace{-\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\rho\,\overline{u_i'u_j'u_k'} + \overline{p\left(\delta_{kj}u_i' + \delta_{ik}u_j'\right)}\right]}_{D_{T,ij}\equiv \text{Turbulent Diffusion}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\mu\frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u_i'u_j'})\right]}_{D_{L,ij}\equiv \text{Molecular Diffusion}}$$

$$\underbrace{-\rho\left(\overline{u_i'u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}+\overline{u_j'u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)}_{P_{ij}\equiv\text{Stress Production}}\underbrace{-\rho\beta(g_i\overline{u_j'\theta}+g_j\overline{u_i'\theta})}_{G_{ij}\equiv\text{Buoyancy Production}}$$

$$+\underbrace{\overline{p\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right)}}_{\phi_{ij}\equiv\text{Pressure Strain}}-\underbrace{2\mu\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\frac{\partial u_j'}{\partial x_k}}}_{\epsilon_{ij}\equiv\text{Dissipation}}$$

$$\underbrace{-2\rho\Omega_k\left(\overline{u_j'u_m'}\epsilon_{ikm}+\overline{u_i'u_m'}\epsilon_{jkm}\right)}_{F_{ij}\equiv\text{Production by System Rotation}}+\underbrace{S_{\text{user}}}_{\text{User-Defined Source Term}} \quad (10.6\text{-}1)$$

在这些项中，C_{ij}, $D_{L,ij}$, P_{ij}, F_{ij} 不需要模型，而 $D_{T,ij}$, G_{ij}, ϕ_{ij} ϵ_{ij} 需要建立模型方程使方程组封闭

10．6-2　湍流扩散模型

Dily-Harlow建立了如下的梯度发散模型：

$$D_{T,ij}=C_s\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho\frac{k\overline{u_k'u_\ell'}}{\epsilon}\frac{\partial\overline{u_i'u_j'}}{\partial x_\ell}\right) \quad (10.6\text{-}2)$$

但这个方程数值稳定性不好，在FLUENT中简化为如下方程：

$$D_{T,ij}=\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial\overline{u_i'u_j'}}{\partial x_k}\right) \quad (10.6\text{-}3)$$

其中 μ_t 用式10。6-3得到。

Lien和Leschziner用此方程在类似的平面剪切流动中得到 σ_k 值为0。82，注意，在标准的

K-ω 模型中，σ_k 为1.0。

10．6-3　　应力应变项模型：

线形应力应变模型：

在FLUENT中经典的 ϕ_{ij} 的求解方法为：

$$\phi_{ij}=\phi_{ij,1}+\phi_{ij,2}+\phi_{ij,w} \quad (10.6\text{-}4)$$

其中，$\phi_{ij,1}$ 为慢压力应变项，$\phi_{ij,2}$ 为快应力应变项。$\phi_{ij,w}$ 为壁面反射项。

$\phi_{ij,1}$ 计算如下，

$$\phi_{ij,1} \equiv -C_1 \rho \, \frac{\epsilon}{k} \left[\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \qquad (10.6\text{-}5)$$

其中$C_1 = 1.8$。

$\phi_{ij,2}$方程如下：

$$\phi_{ij,2} \equiv -C_2 \left[(P_{ij} + F_{ij} + G_{ij} - C_{ij}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (P + G - C) \right] \qquad (10.6\text{-}6)$$

其中，$C_2 = 0.60$, P_{ij}, F_{ij}, G_{ij}和C_{ij}在公式10。6-1中给出，

$P = \frac{1}{2} P_{kk}$, $G = \frac{1}{2} G_{kk}$, and $C = \frac{1}{2} C_{kk}$.

壁面反射项$\phi_{ij,w}$主要为壁面处应力再分配，抑制应力的垂直分量，而加强平行壁面的分量，其方程为：

$$\begin{aligned} \phi_{ij,w} \equiv \; & C_1' \frac{\epsilon}{k} \left(\overline{u_k' u_m'} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u_i' u_k'} n_j n_k - \frac{3}{2} \overline{u_j' u_k'} n_i n_k \right) \frac{k^{3/2}}{C_\ell \epsilon d} \\ & + C_2' \left(\phi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \phi_{ik,2} n_j n_k - \frac{3}{2} \phi_{jk,2} n_i n_k \right) \frac{k^{3/2}}{C_\ell \epsilon d} \end{aligned} \qquad (10.6\text{-}7)$$

其中$C_1' = 0.5$, $C_2' = 0.3$, n_k为壁面处的一个单元，, d为到壁面的距离，$C_\ell = C_\mu^{3/4}/\kappa$

其中，$C_\mu = 0.09$，k为常数0.4187。

线性压力－张力模型的低雷诺数修正

当RSM用于采用强化措施的近壁面流动时，模型需要修正，FLUENT采用C_1, C_2, C_1', C_2'这几个函数进行修正。

$$C_1 = 1 + 2.58 A \sqrt{A_2} \left\{ 1 - \exp \left[-(0.0067 \mathrm{Re}_t)^2 \right] \right\} \qquad (10.6\text{-}8)$$

$$C_2 = 0.75 \sqrt{A} \qquad (10.6\text{-}9)$$

$$C_1' = -\frac{2}{3} C_1 + 1.67 \qquad (10.6\text{-}10)$$

$$C_2' = \max \left[\frac{\frac{2}{3} C_2 - \frac{1}{6}}{C_2}, 0 \right] \qquad (10.6\text{-}11)$$

其中湍流雷诺数定义为$\mathrm{Re}_t = (\rho k^2 / \mu \epsilon)$，参数A及$A_2$，$A_3$定义为：

$$A \equiv \left[1 - \frac{9}{8}(A_2 - A_3)\right] \quad (10.6\text{-}12)$$

$$A_2 \equiv a_{ik}a_{ki} \quad (10.6\text{-}13)$$

$$A_3 \equiv a_{ik}a_{kj}a_{ji} \quad (10.6\text{-}14)$$

a_{ij}为雷诺应力各项异性张量，定义为：

$$a_{ij} = -\left(\frac{-\rho\overline{u_i'u_j'} + \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}}{\rho k}\right) \quad (10.6\text{-}15)$$

以上修正项在平板流动壁面强化处理时才实用。

二次压力－张力模型：

这是FLUENT提供的一个模型，它实用于许多基本的流动，包括平面流，漩涡流和轴对称流，其准确性很高，很适合工程中复杂的流动情况，也可用于粘性表面流动。其方程为：

$$\begin{aligned}\phi_{ij} = &-(C_1\rho\epsilon + C_1^*P)\,b_{ij} + C_2\rho\epsilon\left(b_{ik}b_{kj} - \frac{1}{3}b_{mn}b_{mn}\delta_{ij}\right)\\ &+\left(C_3 - C_3^*\sqrt{b_{ij}b_{ij}}\right)\rho k S_{ij}\\ &+C_4\rho k\left(b_{ik}S_{jk} + b_{jk}S_{ik} - \frac{2}{3}b_{mn}S_{mn}\delta_{ij}\right)\\ &+C_5\rho k\left(b_{ik}\Omega_{jk} + b_{jk}\Omega_{ik}\right)\end{aligned} \quad (10.6\text{-}16)$$

其中 b_{ij}为雷诺各项异性张量，定义为：

$$b_{ij} = -\left(\frac{-\rho\overline{u_i'u_j'} + \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}}{2\rho k}\right) \quad (10.6\text{-}17)$$

平均张率S_{ij}定义为：

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \quad (10.6\text{-}18)$$

平均张量旋率Ω_{ij}定义为：

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (10.6\text{-}19)$$

常数为：

$$C_1 = 3.4,\ C_1^* = 1.8,\ C_2 = 4.2,\ C_3 = 0.8,\ C_3^* = 1.3,\ C_4 = 1.25,\ C_5 = 0.4$$

二次压力－张力模型用于壁面反射时不需要修正，但应注意，它不适用于粘性平面流动中强化壁面处理时的情况。

10．6－4湍流的浮力影响：

浮力的方程为：

$$G_{ij} = \beta \frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\left(g_i \frac{\partial T}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) \qquad (10.6\text{-}20)$$

其中 Pr_t 为湍流的普朗特l数，值为0。85。β 为公式10。4－24定义的热膨胀系数。对于理想气体，其表达式为：

$$G_{ij} = -\frac{\mu_t}{\rho \mathrm{Pr}_t}\left(g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i}\right) \qquad (10.6\text{-}21)$$

10．6－5湍流动量模型

在建立动量模型时，可由雷诺压力－张量中得到：

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i' u_i'} \qquad (10.6\text{-}22)$$

如10。6－8节中描述的，在FLUENT中，为了获得边界条件，必须要求解出流动方程，其方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \frac{1}{2}\left(P_{ii} + G_{ii}\right) - \rho\epsilon(1 + 2\mathrm{M}_t^2) + S_k \qquad (10.6\text{-}23)$$

其中$\sigma_k = 0.82$，S_k 为用户自定义项。此方程由雷诺应力方程得到。尽管此方程在解决大部分的流动情况时，K值主要用于边界条件。但在某些情况下，K值可由方程10。6－22得到，其方法都是类似的。

10．6－6发散率模型

发散张量ϵ_{ij}定义为：

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3}\delta_{ij}(\rho\epsilon + Y_M) \qquad (10.6\text{-}24)$$

其中根据SARKAR模型，$Y_M = 2\rho\epsilon \mathrm{M}_t^2$ 是一个附加的扩散项，湍流MACH数定义为：

$$\mathrm{M}_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \qquad (10.6\text{-}25)$$

其中 $a\ (\equiv \sqrt{\gamma R T})$ 为音速，但流体为理想气体时，这个方程很理想。发散率 ϵ 的计算类似于标准 k-ϵ 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial\epsilon}{\partial x_j}\right]+$$
$$C_{\epsilon 1}\frac{1}{2}\left[P_{ii}+C_{\epsilon 3}G_{ii}\right]\frac{\epsilon}{k}-C_{\epsilon 2}\rho\frac{\epsilon^2}{k}+S_\epsilon \qquad (10.6\text{-}26)$$

其中 $\sigma_\epsilon=1.0,\ C_{\epsilon 1}=1.44,\ C_{\epsilon 2}=1.92$，$C_{\epsilon 3}$ 由10。4－5中流场重力方向的方程得到

S_ϵ 为用户定义项。

10．6－7湍流粘性方程

湍流粘性力 μ_t 的方程为：

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\epsilon} \qquad (10.6\text{-}27)$$

其中 $C_\mu=0.09.$

10．6－8雷诺应力的边界条件

在计算流场时，FLUENT需要知道雷诺应力数 $\overline{u_i' u_j'}$，和湍流扩散率 ϵ. 这些值可直接输入或者湍流强度和特征长度得到

在壁面处，FLUENT由壁面方程计算近壁面的雷诺应力和 ϵ，忽略流动方程中对流与扩散项的影响，并通过一系列规定及平衡条件的假设，FLUENT给出了一个边界条件，在不同的坐标系下（τ 为切线坐标系，η 为标准坐标系，λ 为法线坐标系），近壁面网格雷诺应力的计算方程为：

$$\frac{\overline{u_\tau'^2}}{k}=1.098,\quad \frac{\overline{u_\eta'^2}}{k}=0.247,\quad \frac{\overline{u_\lambda'^2}}{k}=0.655,\quad -\frac{\overline{u_\tau' u_\eta'}}{k}=0.255 \qquad (10.6\text{-}28)$$

FLUENT通过解方程10。6－23得到K，为了计算方便，方程的求解具有通用性，在近壁面处可方便得求得K值，在远壁面处K值可直接由雷诺应力方程10。6－22得到，同时近壁面处流动计算还可考虑用方程10。6－22求解。方程10。6－21仅适用于大流动区域。

上述方程还可采用一下形式：

$$\frac{\overline{u_\tau'^2}}{u_\tau^2}=5.1,\quad \frac{\overline{u_\eta'^2}}{u_\tau^2}=1.0,\quad \frac{\overline{u_\lambda'^2}}{u_\tau^2}=2.3,\quad -\frac{\overline{u_\tau' u_\eta'}}{u_\tau^2}=1.0 \qquad (10.6\text{-}29)$$

其中 u_τ 为摩擦粘性力，定义为：$u_\tau\equiv\sqrt{\tau_w/\rho}$，$\tau_w$ 为壁面剪切应力。

10．6－9 对流热交换及质量交换方程

能量交换模型为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E+p)]=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(k+\frac{c_p\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_j}+u_i(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}}\right]+S_h \quad (10.6\text{-}30)$$

其中E为总能量，$(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}}$为应力张量的分量，定义为：

$$(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}}=\mu_{\mathrm{eff}}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)-\frac{2}{3}\mu_{\mathrm{eff}}\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\delta_{ij}$$

其中$(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}}$为粘性发热，它总是成对计算，不能单独计算。其湍流的普朗特l数为0.85.你可以在粘性流动模型中改变它

质量交换处理方法类似，其湍流Schmidt数为0.7。同样其值在平板粘性流动中改变。

10．7　LES模型

湍流流场中起主导作用的是大尺寸的漩涡，小尺寸的漩涡主要引起湍流动量的扩散。

理论上可以通过直接数值模拟（DNS）尺寸的湍流模型，但是在实际工程中并不可行，它的计算代价太大，不实用。

传统的流场计算方法是用N-S方程，即RANS法，在此方法制，所有的湍流流场都可以模拟，其结果可保存。理论上，LES法处于DNS与RANS之间，大尺寸漩涡用LES法，而小尺寸的漩涡用RANS方程求解，使用LES法的原则如下：

*动量，质量，能量主要由大尺寸漩涡传输

*大涡在流动中期主导作用，它们主要由流动的几何，边界条件来确定。

*小涡不起主导作用（尺寸上），单其解决方法更具有通用性

*当仅有小涡时，更容易建立通用的模型

当解决仅有大涡否则仅有小涡的问题时，所受的限制要比DNS法少的多。

然而在实际工程中，需要很好的网格划分，这需要很大的计算代价，只有计算机硬件性能大幅提高，或者采用并行运算，LES才可能用于实际工程。

下面给出了LES方程，同时给出了网格上的张力模型机其边界条件。

10．7－1过滤的N-S方程

LES方程通过在傅立叶或空间域N-S方程滤掉时间项得到方程，在计算在，可以有效的滤掉比过滤网格小的漩涡，从而得到大涡的动量方程。

过滤的变量定义为：

$$\overline{\phi}(\mathbf{x})=\int_{\mathcal{D}}\phi(\mathbf{x}')G(\mathbf{x},\mathbf{x}')d\mathbf{x}' \quad (10.7\text{-}1)$$

其中D为流场区域，G为决定过滤尺寸的函数，在FLUENT中离散化本身就提供了过滤操作

$$\overline{\phi}(\mathbf{x})=\frac{1}{V}\int_{\mathcal{V}}\phi(\mathbf{x}')\,d\mathbf{x}',\quad \mathbf{x}'\in\mathcal{V} \quad (10.7\text{-}2)$$

其中V为计算单元的体积，过滤函数$G(\mathbf{x},\mathbf{x}')$定义为：

$$G(\mathbf{x},\mathbf{x}')\begin{cases}1/V, & \mathbf{x}'\in\mathcal{V}\\ 0, & \mathbf{x}'\ \text{otherwise}\end{cases} \quad (10.7\text{-}3)$$

但是用LES去计算可压缩流体还不现实，这个理论主要用于不可压缩流体，可以认为，FLUENT将采用LES模型来解决不可压缩流体。

过滤不可压缩N-S方程，将得到一下方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u}_i) = 0 \qquad (10.7\text{-}4)$$

和

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u}_i \overline{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (10.7\text{-}5)$$

其中τ_{ij}为亚网格张力，定义为：

$$\tau_{ij} \equiv \rho \overline{u_i u_j} - \rho \overline{u}_i \overline{u}_j \qquad (10.7\text{-}6)$$

很明显，这几个方程是类似的其不同之处在于所依赖的变量为过滤后的量，而不是平均量，同时张力表达式不同。

10．7－2亚网格模型

过滤后得到的亚网格张力并不知道，需要建模，目前用的最广的漩涡粘性模型方程为：

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij} = -2\mu_t \overline{S}_{ij} \qquad (10.7\text{-}7)$$

其中μ_t为亚网格湍流粘性力，$\overline{S}_{ii}$是其张量旋率，定义为：

$$\overline{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right) \qquad (10.7\text{-}8)$$

FLUENT中有两个关于μ_t地模型，Smagorinsky-Lilly模型和基于RNG的亚网格模型。

Samagorin-Lilly模型

这个模型是亚网格模型的基础，由Samagorin提出并由Lilly进一步完善，此模型方程为：

$$\mu_t = \rho L_s^2 \left|\overline{S}\right| \qquad (10.7\text{-}9)$$

其中，L_s为网格的混合长度，并且$\left|\overline{S}\right| \equiv \sqrt{2\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij}}$. C_s为Samagorin常数，，在FLUENT中，L_s计算公式为：

$$L_s = \min\left(\kappa d, C_s V^{1/3}\right) \qquad (10.7\text{-}10)$$

其中K为von Kármán常数，d为到最近的壁面的距离，V为计算单元的体积。

Lilly通过在惯性区域的类似的湍流计算得到C_s值为0.23。然而这个值在平均剪切力出现时

或流场过渡区建引起很大的阻尼振动，$C_s=0.1$对大部分流动来说是一个理想的值，目前FLUENT采用这个值。

基于RNG地亚网格模型

用RNG可以得到亚网格粘性力模型，用RNG的过程中得到亚网格粘性力$\mu_{\text{eff}}=\mu+\mu_t$，其表达式为：

$$\mu_{\text{eff}}=\mu\left[1+H(x)\right]^{1/3} \qquad (10.7\text{-}11)$$

$H(x)$为Heaviside函数

$$H(x)=\begin{cases} x, & x>0 \\ 0, & x\le 0 \end{cases} \qquad (10.7\text{-}12)$$

其中

$$x=\frac{\mu_s^2\mu_{\text{eff}}}{\mu^3}-C \qquad (10.7\text{-}13)$$

和

$$\mu_s=(C_{\text{rng}}V^{1/3})^2\sqrt{2\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij}} \qquad (10.7\text{-}14)$$

其中V为计算单元的体积，这个理论给出$C_{\text{rng}}=$ 0.157和C＝100。

在大湍流区域$(\mu_t\gg\mu)$，$\mu_{\text{eff}}\approx\mu_s$，基于亚网格的模型演变成Samagorin-Lilly模型，但模型的常数要改变，在低雷诺数的流动区域，坡面函数已没有意义，流体间的分之粘性力恢复作用，从而能够在过渡区域及近壁面处建立基于RNG的低雷诺数亚网格漩涡粘性力方程。

10．7－3LES模型的边界条件

有随机扰动理论，在指定速度进口的边界处，流动的速度组成可表示为：

$$\overline{u}_i=<\overline{u}_i>+I\ \psi\ |\overline{\mathbf{u}}| \qquad (10.7\text{-}15)$$

其中I为波动强度，ψ为Gaussion随机数，定义为$\overline{\psi}=0$,和$\sqrt{\overline{\psi'}}=1$。

如果网格划分得很好，则可由薄壁面应力－张力间的关系得到如下的壁面剪切力方程：

$$\frac{\overline{u}}{u_\tau}=\frac{\rho u_\tau y}{\mu} \qquad (10.7\text{-}16)$$

如果网格划分很粗糙，则不能解决薄壁面的流动情况，可以假定与壁面相邻的网格单元的质心处于边界层的对流区域，其方程可表达为：

$$\frac{\overline{u}}{u_\tau}=\frac{1}{\kappa}\ln E\left(\frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right) \qquad (10.7\text{-}17)$$

其中k为 von Kármán 常数，E=9.793。

10．8受壁面限制的湍流流动的近壁面处的处理方法

10，8－1概述

湍流流动受壁面的影响很大，很明显，平均流动区域将由于壁面不光滑而受到影响。当然，湍流还受到壁面其他的一些影响。在离壁面很近的地方，粘性力将抑制流体切线方向速度的变化，而且流体运动受壁面阻碍从而抑制了正常的波动。

但近壁面的外部区域，湍流动能受平均流速的影响而增大，湍流运动加剧。

k-ϵ 模型，RSM模型。LES模型都仅适用于湍流核心区域（一般都远离壁面），应该考虑怎样使这些模型适用于壁面边界层处的流动。如果近壁面的网格划分足够好，Spalart-Allmaras 和 k-ω 模型可以用来解决边界层的流动。

无数试验表明，近壁面区域可以分成三层区域，在最里层，又叫粘性力层，流动区域很薄，在这个区域里，粘性力在动量，热量及质量交换中都起主导作用，处于这两层中间的区域，粘性力作用于湍流作用相当，图10.8－1清楚地显示了这三层的流动情况（用半对数坐标）。

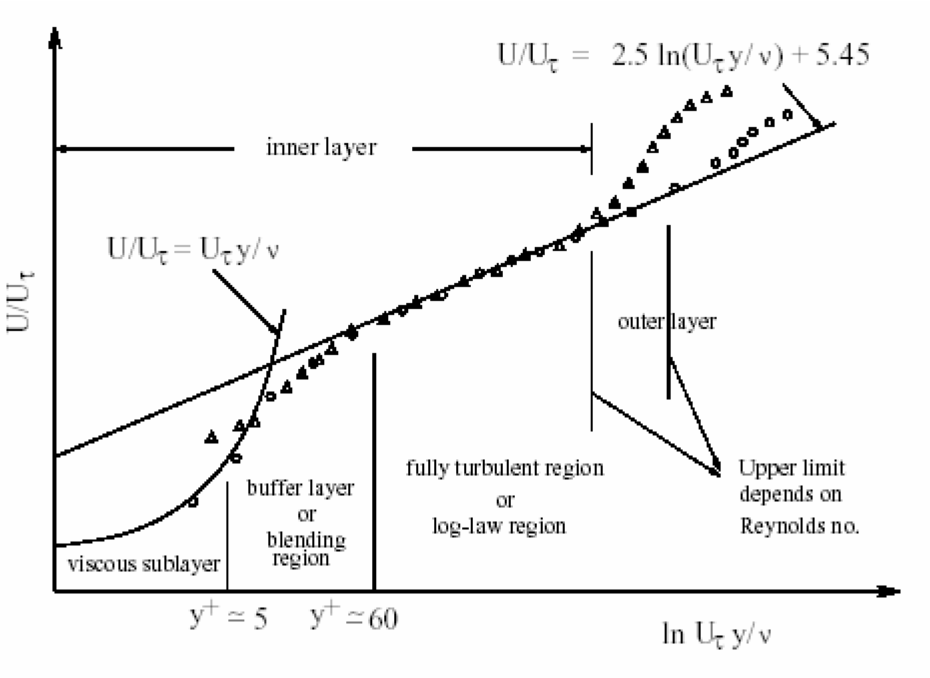


Figure 10.8.1: Subdivisions of the Near-Wall Region

壁面方程和近壁面模型

通常，有两种方法为近壁面区域建模，其中一种方法并不能解决受粘性力影响的区域（粘性力层及过渡层），可采用被称为“壁面方程”的半经验公式来解决，壁面方程的运用能够很好地修正湍流模型，从而解决壁面的存在对流动的影响。

在另一种方法中。湍流模型被修正，从而使壁面处受粘性力影响的区域也能用网格划分来解决，这种方式被成为“近壁面模型”法，下用图进行这两种方法的对比。

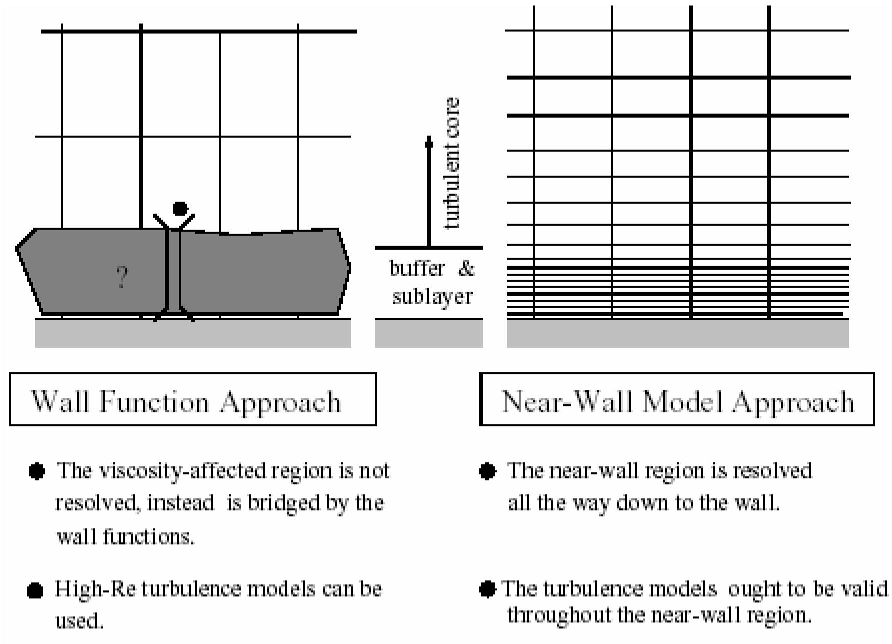


Figure 10.8.2: Near-Wall Treatments in FLUENT

对于大多数高雷诺数的流动，壁面方程法能充分节省计算资源，因为在近壁面粘性力影响区域，由于变量的变化太快，不需要解决，这种方法经济，实用而且很精确，很受欢迎，对于这种工业上的流动模拟，这是一个很好的方法。

然而壁面方程法运用在低雷诺数流动区域却并不理想，其所依赖的壁面方程的假设不再成立，在这种情况下，需要用“近壁面模型”来解决粘性力影响区域的流动。

FLUENT同时提供了以上两种方法。

Spalart-Allmaras, k-ω,LES模型的近壁面处理法

分别看10.3.6节，10.5.1节，10.7.3节中对这几种模型的处理方法

10．8－2壁面方程组

壁面方程组包括半经验公式和近壁面处网格的参数与壁面定性参数的方程，它包括：

*壁面处的平均速度及温度规律

*近壁面处的湍流定性公式

FLUENT提供了两种壁面方程：

*标准壁面函数

*不平衡的壁面函数

标准壁面函数

FLUENT中的标准壁面方程组建立在Launder和Spalading的假设上，并被广泛用于工业上的流动。

动量

在平均流速区域，其方程为：

$$U^* = \frac{1}{\kappa}\ln(Ey^*) \qquad (10.8\text{-}1)$$

其中：

$$U^* \equiv \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w/\rho} \qquad (10.8\text{-}2)$$

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \qquad (10.8\text{-}3)$$

K= von Kármán constant（=0.42）

E=经验常数（=9.81）

U_P=P点的流体的平均流速

k_P=P点的湍流动能

y_P=P点到壁面的距离

μ =流动的动力粘性系数

当y^*大于30到60之间时，上面的对数法则有效，在FLUENT中，y^*取值为y^*>11.225,当壁面相邻的网格单元y^*<11.225 时，FLUENT将采用薄壁面应力－张力模型，其形式为：

$$U^* = y^* \qquad (10.8\text{-}4)$$

注意，在FLUENT中，平均流速及温度的壁面法则是建立在壁面单元y^*的基础上，而不是$y^+ (\equiv \rho u_\tau y/\mu)$。这些定性参数在平衡的湍流边界层内近似相等。

能量

动量及能量方程的雷诺相似使得它们的平均温度的对数法则也相似，在FLUENT中，壁面的温度法则包括以下两条：

- 对热传导层采用线性法则
- 湍流占主导的湍流区域采用对数法则

热传导层的厚度与速度边界层的厚度不同，并且随流体的改变而改变，例如，高普朗特数的流体温度边界层的厚度比其速度边界层薄很多，而对于低普朗特数的流体则刚好相反。

由于粘性力消耗散热不同，高可压缩性流体在近壁面处的温度分布明显不同于亚音速的流体，在FLUENT中，温度壁面方程包含了粘性力消耗散热项。

FLUENT中的壁面法则方程为：

$$T^* \equiv \frac{(T_w - T_P)\rho c_p C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\dot{q}}$$

$$= \begin{cases} \Pr y^* + \frac{1}{2}\rho \Pr \frac{C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\dot{q}} U_P^2 & (y^* < y_T^*) \\ \Pr_t \left[\frac{1}{\kappa}\ln(Ey^*) + P\right] + \\ \frac{1}{2}\rho \frac{C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\dot{q}} \left\{\Pr_t U_P^2 + (\Pr - \Pr_t) U_c^2\right\} & (y^* > y_T^*) \end{cases} \quad (10.8\text{-}5)$$

其中P用Jayatilleke给的公式计算：

$$P = 9.24 \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_t}\right)^{3/4} - 1\right]\left[1 + 0.28e^{-0.007\sigma/\sigma_t}\right] \qquad (10.8\text{-}6)$$

k_f＝流体的热传导率

ρ＝流体的密度

c_p＝流体的热容

$\dot{q}$＝热流量

T_P＝近壁面网格的温度

T_w＝壁面的温度

$\Pr$＝分子普朗特数

$\Pr_t$＝湍流普朗特数

A＝26（Van Driest常数）

k＝0.4187(von Kármán常数)

E＝9.793(壁面方程常数)

U_c＝$y^* = y_T^*$处的平均速度

注意，如果分开计算，则

$$\frac{1}{2}\rho \Pr \frac{C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\dot{q}} U_P^2$$

和

$$\frac{1}{2}\rho \frac{C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\dot{q}} \left\{\Pr_t U_P^2 + (\Pr - \Pr_t) U_c^2\right\}$$

这两项仅在计算可压缩流体时才在方程10.8.5中考虑，在公式10.8.5中，无空间方向性的热边界层厚度y_T^*的计算与y^*一样，如果给出了流体模型的分子普朗特数，则可考虑用线性法则和对数法则来求解

用壁面温度法则分析的过程如下：一旦要计算的流体的物性参数给出，则可以算出它的分子普朗特数，然后由线性法则和对数法则用分子普朗特数计算热边界层厚度y_T^*并保存结果。用壁面网格单元的y^*值，由方程10.8.5中的线性法则和对数法则反复计算得出壁面温度$\dot{T_w}$或热流量$\dot{q}$。

流体种类：

当用不同种类流体传输的壁面方程时，FLUENT认为它们的热传递是相似的，不同种类流体的壁面法则可表达为一下的常用的流动方程（不含流动扩散项）：

$$\begin{aligned} Y^* &\equiv \frac{(Y_{i,w} - Y_i)\,\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{J_{i,w}} \\ &= \begin{cases} \mathrm{Sc}\, y^* & (y^* < y_c^*) \\ \mathrm{Sc}_t \left[\frac{1}{\kappa}\ln(E y^*) + P_c\right] & (y^* > y_c^*) \end{cases} \end{aligned} \qquad (10.8\text{-}7)$$

其中Y_i为实际流体的质量数。Sc和Sc_t分别为分子和湍流施密特数，$J_{i,w}$为壁面处第i种流体的扩散量。注意P_c和y_c^*计算类似于P和y_T^*，不同之处在于把普朗特数换成施密特数进行计算。

湍流

在k-ϵ模型及RSM模型中，K方程在整个流动区域，包括壁面附近区域都适用。

K在壁面处的边界条件为：

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \qquad (10.8\text{-}8)$$

其中n为壁面处的坐标。

在壁面附近处的流体动能G_k和它的发散率ϵ的计算建立在此处的平衡假设上，该假设认为：k的产生及其发散率等于壁面附近的控制容积。

因此，k的计算公式为：

$$G_k \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P} \qquad (10.8\text{-}9)$$

ϵ 的计算公式为：

$$\epsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa y_P} \qquad (10.8\text{-}10)$$

注意，包括平均流速，温度，k和 ϵ 等几个壁面边界条件的参数，壁面方程组都考虑到了，所以不用担心壁面边界条件的适用性。
FLUENT首选标准壁面方程组，它能很好的计算出以壁面为边界的流动情况。但是，当流体流动分离太大。以致于远远偏离了理想条件时，就不太适用了，在其他情况下，剪切应力及平衡假设大大限制了壁面方程的通用性。
相应的，当近壁面流动处于高压之下时，当流动处于不平衡状态时，这些假设就不在成立了。不平衡方程组提供了处理以上情况的方法

不平衡方程组
作为标准壁面方程的补充，FLUENT提供了基于两层理论的不平衡壁面方程，其方程的关键为：

*Launder和Spalding的对数法则由压力的影响进行修正

*采用两层理论来计算湍流壁面附近单元的动能

壁面温度法则等其他方程保持不变
由压力修正的平均流速对数法则为：

$$\frac{\tilde{U} C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w/\rho} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(E \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu}\right) \qquad (10.8\text{-}11)$$

其中：

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2}\frac{dp}{dx}\left[\frac{y_v}{\rho\kappa\sqrt{k}} \ln\left(\frac{y}{y_v}\right) + \frac{y - y_v}{\rho\kappa\sqrt{k}} + \frac{y_v^2}{\mu}\right] \qquad (10.8\text{-}12)$$

y_v 为物理粘性层厚度，计算公式为：

$$y_v \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}} \qquad (10.8\text{-}13)$$

其中 y_v^*＝11.225.
不平衡方程采用两层理论来计算湍流壁面附近单元的湍流动能，从而解决了壁面附近单元的k方程的求解。壁面附近单元包含了粘性流动层和湍流层，下面给出了湍流定性参数的假设条件：

$$\tau_t = \begin{cases} 0, & y < y_v \\ \tau_w, & y > y_v \end{cases} \quad k = \begin{cases} \left(\frac{y}{y_v}\right)^2 k_P, & y < y_v \\ k_P, & y > y_v \end{cases} \quad \epsilon = \begin{cases} \frac{2\nu k}{y^2}, & y < y_v \\ \frac{k^{3/2}}{C_\ell y}, & y > y_v \end{cases} \qquad (10.8\text{-}14)$$

其中 $C_l = kC_u^{-3/4}$，y_v 为粘性底层的空间厚度，见式（10.8−13）。

利用这些断面，就可以从邻近边界的单元格的 G_k 和 $\in$ 的体平均数中计算出 k 的单元平均的产出量 $\overline{G_k}$ 和单元平均扩散率 $\overline{\in}$。对于四边形、六面体网格，其体平均可近似地用深度平均来表示：

$$\overline{G_k} \equiv \frac{1}{y_n}\int_0^{y_n} \tau_t \frac{\partial U}{\partial y} dy = \frac{1}{ky_n}\frac{\tau_w^2}{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}} \ln(\frac{y_n}{y_v}) \tag{10.8-15}$$

和

$$\overline{\in} = \frac{1}{y_n}\int_0^{y_n} \in dy \equiv \frac{1}{y_n}\left[\frac{2v}{y_v} + \frac{k_P^{1/2}}{C_l}\ln(\frac{y_n}{y_v})\right]k_P \tag{10.8-16}$$

其中 y_n 是单元格的高度（$y_n = 2y_P$）。对于其他形状的网格（例如：三角形、四面体网格），使用适当的体平均数。

在式（10.8-15）和（10.8-16）中，靠近边界的单元格的湍流动态能量预算对粘性底层与完全湍流层之间的比例是十分敏感的，而其在非平衡流中单元之间又有着很大的变动。这有效地放宽了局部平衡假定（产出量 = 耗散量）——被标准墙函数用来计算靠近边界单元格的湍流动态能量预算。因此，非平衡墙函数可在一定程度上解释为忽视了非平衡影响后的标准壁面函数。

标准壁面函数与非平衡壁面函数

由于有了对压力梯度和偏移平衡点进行部分说明的能力，非平衡壁面函数被推荐使用在包含脱流、回流和冲击的复杂流动当中，在这种流动中，中间流动和湍流有着很大的压力梯度并且快速地变化。这种流动可以获得很好的改进，尤其是在对壁面的修剪（表面摩擦系数）和热传导（纳塞特或斯坦顿数）的预算方面。

壁面函数方法的局限性

标准的壁面函数能够为大多数高雷诺数的边界限制流提供合理、精确的预测。而非平衡壁面函数主要是在有大的压力梯度或是不平衡程度很高时被使用。然而，当流动条件与基本的墙函数的理想条件相差太大时，墙函数方法将不可靠。例如：

- 雷诺数较低或有近壁面影响（例如：通过一条小裂缝或者粘性很大得流动，低速率流）
- 沿壁面有大量的耗散
- 巨大的压力梯度导致边界层分离
- 受到强大的强迫力（例如：旋转盘附近的流动，浮力流）
- 在靠近壁面区域流动具有高的三维特性（例如：Ekman 螺旋流动，强烈扭曲的三维边界层）

如果以上任意一条是你所建流动模型的主要特征，为了你的模拟的成功，捕获那些特征是十分重要的，你必须在使用近壁面模型方法的同时，在靠近壁面的区域内要有足够的网格的分辨率。FLUENT 为这些情况提供了增强的壁面处理。这个方法在 $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型中得以使用。

10.8.3 增强壁面处理

增强壁面处理是一种近壁面模型方法，它通过增强壁面函数结合了一个双层模型。如果靠近壁面的网格足够好，能够解决薄片状的亚表层（典型情况 $y^+ \approx 1$），那么这里的增强壁面处理就等同与传统的双层带状模型（详情下面有介绍）。然而，为了使得靠近壁面的网格足够好，势必会大大地增加运算量。因此，人们想有一种理想的近壁面的公式表达，使其对粗劣的网格（通常被作为壁面函数网格）和对优质的网格（低雷诺数网格）一样适用。另外，对于那些近壁面单元格质心位于全湍流区域的中间网格，很精细将不会引发额外的错误，但是太粗劣的话，就不能很好地解析亚表层。

为了达到采用近壁面模型方法的目的，将要为细近壁面网格保证标准双层模型方法的精确度，同时，不会较大地减小对壁面函数网格地精确度。FLUENT 能够将双层模型和增强壁面函数相结合，如下一节所述。

增强壁面函数的双层模型

在 FLUENT 的近壁面模型中，有粘性影响的近壁面区域总是完全地当作粘性亚表层来解决。双层模型方法是增强壁面处理的一个不可缺少的部分，它被用来指定∈和近壁面单元格的湍流的粘性。此方法中，整个区域被分为一个有粘性影响的区域和一个完全湍流区域。这两个区域的划分由以下几个因素决定：壁面距离，湍流雷诺数，Re_y。其中 Re_y 被定义为

$$\mathrm{Re}_y \equiv \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \qquad (10.8\text{-}17)$$

这里的 y 是表示从壁面到单元格中心的垂直距离。在 FLUENT 中，y 表示的是离最近的壁面的距离：

$$y \equiv \min_{\vec{r}_w \in \Gamma_w} \left\| \vec{r} - \vec{r}_w \right\| \qquad (10.8\text{-}18)$$

其中，$\vec{r}$ 是区域内点的位置矢量，$\vec{r}_w$ 是在壁面边界上的位置矢量，Γ_w 是所有壁面边界的集合。这种表示方法可以在复杂形状的多壁面流动区域中给 y 一个唯一的定义。而且，这样定义的 y 不受网格布局的约束，并且对非结构化网格也适用。

在完全湍流区（$\mathrm{Re}_y > \mathrm{Re}_y^*; \mathrm{Re}_y^* = 200$），将使用 $k-\varepsilon$ 模型或雷诺应力模型（见 10.4 节和 10.6 节）。

在有粘性影响的近壁面区域（$\mathrm{Re}_y < \mathrm{Re}_y^*$），使用 Wolfstein[269]的 one-equation 模型。在 one-equation 模型中，如 10.4 节和 10.6 节所述，保留了动量方程和 k 方程。只是，湍流粘性，μ_t，改由下式计算

$$\mu_{t,2layer} = \rho C_\mu l_\mu \sqrt{k} \qquad (10.8\text{-}19)$$

其中[34]

$$l_\mu = y c_l \left(1 - e^{-\mathrm{Re}_y / A_\mu}\right) \qquad (10.8\text{-}20)$$

上面描述的湍流粘性的双层模型公式被用作增强壁面处理一部分，这里的双层模型定义很好结合了 Jongen[106]提出的从外部区域引入的高雷诺数 μ_t 的定义：

$$\mu_{t,enh} = \lambda_\varepsilon \mu_t + (1-\lambda_\varepsilon)\mu_{t,2layer} \qquad (10.8\text{-}21)$$

这里的 μ_t 是在 10.4 或 10.6 节中为 $k-\varepsilon$ 模型或雷诺应力模型定义的高雷诺数。λ_ε 是一个

混合函数，它是这样定义的，当远离壁面时为 1，接近壁面时为 0。如下式：

$$\lambda_\varepsilon = \frac{1}{2}\left[1+\tanh\left(\frac{\mathrm{Re}_y - \mathrm{Re}_y^*}{A}\right)\right] \qquad (10.8\text{-}22)$$

常数 A 决定了改混合函数的宽度。通过定义这样一个宽度，λ_ε 的值将在 $\Delta\mathrm{Re}_y$ 变化量的1%之内，其结果为：

$$A = \frac{\left|\Delta\mathrm{Re}_y\right|}{\tanh(0.98)} \qquad (10.8\text{-}23)$$

一般情况下，$\Delta\mathrm{Re}_y$ 的赋值将在 Re_y^* 的5%到20%之间。引入 λ_ε 的主要目的是为了防止当在外层的 $k-\varepsilon$ 的解与双层模型公式不匹配时影响收敛。

ε 由下式计算：

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \qquad (10.8\text{-}24)$$

（10.8-24）式中的 l_ε 再一次由 Chen 和 Patel[34]计算：

$$l_\varepsilon = y c_l \left(1 - e^{-\mathrm{Re}_y / A_\varepsilon}\right) \qquad (10.8\text{-}25)$$

如果整个流动区域都处于粘性影响区域（$\mathrm{Re}_y < 200$），解移动方程时将不包含 ε；只是通过式（10.8-24）代数地将其包含进来。为了确保内部区间 ε 代数描述和外部区间解位移方程的包含 ɜ 的情况之间地平稳转换，FLUENT 为 ε 描述使用了一个类似于 μ_t 混合的程序。

式（10.8-20）和(10.8-25)中常数的确定：

$$c_l = kC_\mu^{-3/4},\quad A_\mu = 70,\quad A_\varepsilon = 2c_l \qquad (10.8\text{-}26)$$

增强壁面函数

要想将它的应用范围拓展到贯穿近壁面区域（即，薄片状的亚表层，过渡区和完全湍流区）需要对整个壁面区域将壁面规则拟定为一个单一的壁面规则。为此，FLUENT 使用一个由 Kader[108]提出的函数将线性的（薄片状）和对数的（湍流）壁面规则结合起来：

$$u^+ = e^{\Gamma} u_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{turb}^+ \qquad (10.8\text{-}27)$$

其中：

$$\Gamma = -\frac{a(y^+)^4}{1+by^+} \qquad (10.8\text{-}28)$$

$$c = \exp\left(\frac{E}{E''} - 1.0\right) \qquad (10.8\text{-}29)$$

$$a = 0.01c \qquad (10.8\text{-}30)$$

$$b = \frac{5}{c} \qquad (10.8\text{-}31)$$

类似地，引出$\frac{du^+}{dy^+}$的综合方程为：

$$\frac{du^+}{dy^+}=e^{\Gamma}\frac{du^+_{lam}}{dy^+}+e^{\frac{1}{\Gamma}}\frac{du^+_{turb}}{dy^+} \qquad (10.8\text{-}32)$$

这种方法使得完全湍流规则考虑一些其他地影响，如压力梯度或者是一些可变的性质，从而变得容易修改和扩展。同时，这个规则也保证了y^+大小值之间正确的渐进性质和壁面缓冲区（$3<y^+<10$）内y^+下降处速度剖面的合理说明。

通过平稳地结合增强湍流壁面规则和薄片状壁面规则，使增强壁面函数得到了进一步的发展。通过结合 White、Cristoph[266]和 Huang et al. [95]等人地方法，已经得到了带有热传导和压力梯度的可压缩流体的增强湍流壁面规则：

$$\frac{du^+_{turb}}{dy^+}=\frac{1}{ky^+}\left[S'(1-\beta u^+-\gamma(u^+)^2)\right]^{1/2} \qquad (10.8\text{-}33)$$

其中

$$S'=\begin{cases}1+\alpha y^+ & y^+<y_s^+\\ 1+\alpha y_s^+ & y^+\ge y_s^+\end{cases} \qquad (10.8\text{-}34)$$

$$\alpha\equiv\frac{v_w}{\tau_w u^*}\frac{dp}{dx}=\frac{\mu}{\rho^2\left(u^*\right)^3}\frac{dp}{dx} \qquad (10.8\text{-}35)$$

$$\beta\equiv\frac{\sigma_t q_w u^*}{c_p\tau_w T_w}=\frac{\sigma_t q_w}{\rho c_p u^* T_w} \qquad (10.8\text{-}36)$$

$$\gamma\equiv\frac{\sigma_t(u^*)^2}{2c_p T_w} \qquad (10.8\text{-}37)$$

这里的y_s^+是对数壁面规则的斜率保持不变的位置。默认时，$y_s^+=60$。式（10.8-33）中的系数α表征的是压力梯度的影响，而系数β和γ表征的是热影响。式（10.8-33）是一个普通地微分方程，FLUENT将为其提供一个适当的解析解。当α，β和γ均为0时，导出的是一个典型的湍流对数壁面规则的解析解。

薄片状壁面规则由下面的表达式确定：

$$\frac{du^+_{lam}}{dy^+}=1+\alpha y^+ \qquad (10.8\text{-}38)$$

注意到上面的表达式中，仅仅通过α包含了压力梯度的影响，而忽略了由热传导和可压缩性带来的一些可变特性的影响。这些影响被忽略的原因是当很靠近壁面时它们的影响是非常小的。由（10.8-38）式微分方程可以得到：

$$u^+_{lam}=y^+\left(1+\frac{\alpha}{2}y^+\right) \qquad (10.8\text{-}39)$$

增强热壁面函数针对u^+剖面沿用了同样的方法。统一的壁面热量公式按照 Kader[108]方法将薄片状剖面和对数剖面融合在一起：

$$T^+ = e^{\Gamma} T^+_{lam} + e^{\frac{1}{\Gamma}} T^+_{turb} \quad (10.8\text{-}40)$$

其中

$$\Gamma = -\frac{a(\Pr y^+)^4}{1 + b\Pr^3 y^+} \quad (10.8\text{-}41)$$

这里的Pr是分子的普朗特数，系数a和b分别由式（10.8-30）和（10.8-31）确定。除了上面的T^+的公式以外，增强热壁面函数在其它方面和标准的热壁面函数（见 10.8.2 节）完全一样。当使用增强壁面函数时，类壁面函数也采用一个类似的过程。类壁面函数的详情见 10.8.2 节。

湍流动能的边界条件和标准壁面函数（式 10.8-8）的完全相同。只是湍流动能的产出是利用与增强壁面规则（式 10.8-27 和 10.8-32）相一致的速度梯度来计算，以确保贯穿近壁面区域的公式的正确性。

10.9　湍流流动模拟中网格的探讨

成功的湍流流动计算在生成网格时必须要做一些考虑。由于湍流度（随空间变化的粘性）在大多数的复杂湍流流动的平均动量和其他一些量的转化中起主导作用，你必须确定湍流度的大小适合求解，是否需要更高的精度。由于平均流和湍流的剧烈的交互作用，使得湍流流动的数值结果比薄片层流动的数值结果对网格的依赖更加敏感。

因此，当你所要求解的区域平均流动变化很快并且存在有大比率应变的剪切层时，建议使用足够好的网格。

你可以通过列出或者是点绘出y^+，y^*和Re_r的值来检查近壁面网格，这些值在处理过控制面板之后是可以得到的。应该记住，y^+，y^*和Re_r不是固定的几何大小。它们都是由解决定的。例如，当你使网格数翻倍（壁面距离就减半）时，新的y^+并不需要变成原来y^+的一半。

对于近壁面区域的网格，要根据你所使用近壁面选项决定采用何种不同的策略。在 10.9.1 和 10.9.2 节中将介绍生成近壁面网格的大体的方针。

10.9.1 壁面函数的近壁面网格的指导方针

确定邻近壁面单元格到壁面的距离时，必须考虑到对数壁面规则的有效范围。这个距离通常用壁面单位，y^+（$\equiv \rho u_\tau y/\mu$）或y^*，来度量。注意，当第一个单元格位于对数层时，y^+和y^*有同等的值。

- 对数规则的有效范围是y^+在 30 到 60 之间。
- 虽然当$y^+ < 11.225$时，FLUENT 采用的是线性（薄片状）规则，但是应该避免在壁面附近采用很好的网格，因为壁面函数在粘性的亚表层将不再有效。
- 对数层的上边界依赖于压力梯度和雷诺数。当雷诺数增加时，上边界也趋向于上浮。y^+值太大是不理想的，因为这样会使对数层上面的尾流部分变得很大。

- y^+的值在接近下边界（$y^+ \approx 30$）时是最好的。
- 应当避免在壁面的法线方向使用过分的拉伸。
- 在边界层内至少要有一定量的网格。

10.9.2 增强壁面处理的近壁面网格的指导方针

虽然增强壁面处理是用来拓展在粘性亚表层之外的近壁面模型的有效性，但是仍然建议你构造一个完全求解有粘性影响的近壁面区域的网格。在这种情况下，增强壁面处理的双层部分将占主导地位，以下为推荐的网格必备条件（注意，这里的网格必备条件是依据 y^+，而不是 y^*）：

- 当增强壁面处理被用来求解薄片状的亚表层时，邻近壁面的单元格的 y^+ 应该取为 1。然而，当其充分地在粘性亚表层时，y^+ 可以取更高的值（y^+ 小于 4 到 5）。
- 为了能够求解这个区域内地平均速度和湍流度，你应当在有粘性影响地近壁面区域（$\mathrm{Re}_y < 200$）内至少有 10 个单元格。

10.9.3 Spalart－Allmaras 模型的近壁面网格的指导方针

Spalart–Allmaras 模型是一个完全的低雷诺数模型。这意味着，它预定了使用适合求解有粘性影响区域的网格，为了适当地削弱粘性亚表层湍流粘性，在模型中构建了衰减函数。因此，为了保留 Spalart–Allmaras 模型全部的优点，近壁面网格间距应当和 10.9.2 节中为增强壁面处理所描述的一样。

然而，正如 10.3.6 节中所讨论的，Spalart–Allmaras 模型的边界条件已经实行，因此，该模型的网格粗劣，这对壁面函数方法比较适合。如果你正使用一粗劣网格，你应该遵循 10.9.1 节所描述的指导方针。

总之，为了得到 Spalart–Allmaras 模型最好的结果，你要么使用质量很高的近壁面网格间距（大约 $y^+ = 1$），要么使用 $y^+ \geq 30$ 的网格间距。

10.9.4 $k-\varepsilon$ 模型的近壁面网格的指导方针

在 FLUENT 中，$k-\varepsilon$ 模型无论是作为低雷诺数模型还是作为高雷诺数模型都是有效的。如果选中 Viscous Model 面板中的 Transitional Flows 选项，那么使用的是低雷诺数变量，那样的话，网格的指导方针就和增强壁面函数的完全一样。如果没有选中该选项，网格指导方针就和壁面函数的一样。

10.9.5 大漩涡模拟的近壁面网格的指导方针

对于 FLUENT 中大漩涡模拟（LES）的执行过程，其边界条件已经通过利用 10.7.3 节中描述的一种壁面规则方法实现了。这意味着，对近壁面网格间距不存在计算的限制。然而，为了得到最好的结果，可能需要使用高质量的近壁面网格间距（大约 $y^+ = 1$）。

10.10 湍流流动的问题的设置工作

当你的 FLUENT 模型包含有湍流时，你需要激活相应模型和选项，并且提供湍流的边界条件。在这一节里将对这些输入进行描述。

一个湍流流动问题的设置过程描述如下。（注意：这里描述的过程仅仅包括对湍流模型本身的一些必要步骤；你还需要照常设置一些其他模型，边界条件等等）

1. 激活湍流模型，在 Viscous Model 面板的 Model 框中选择一种模型（见表 10.10.1）。

Define → Model → Viscous…

如果你选的是 k-epsilon 模型，就在 k-epsilon Model 选项框中的 Standard，RNG，Realizable 三个选项中选择一个。如果你选的是 k-omega 模型，就在 k-omega Model 选项框中的 Standard，SST 两个选项中选择一个。

大漩涡模型（LES）仅对三维有效。

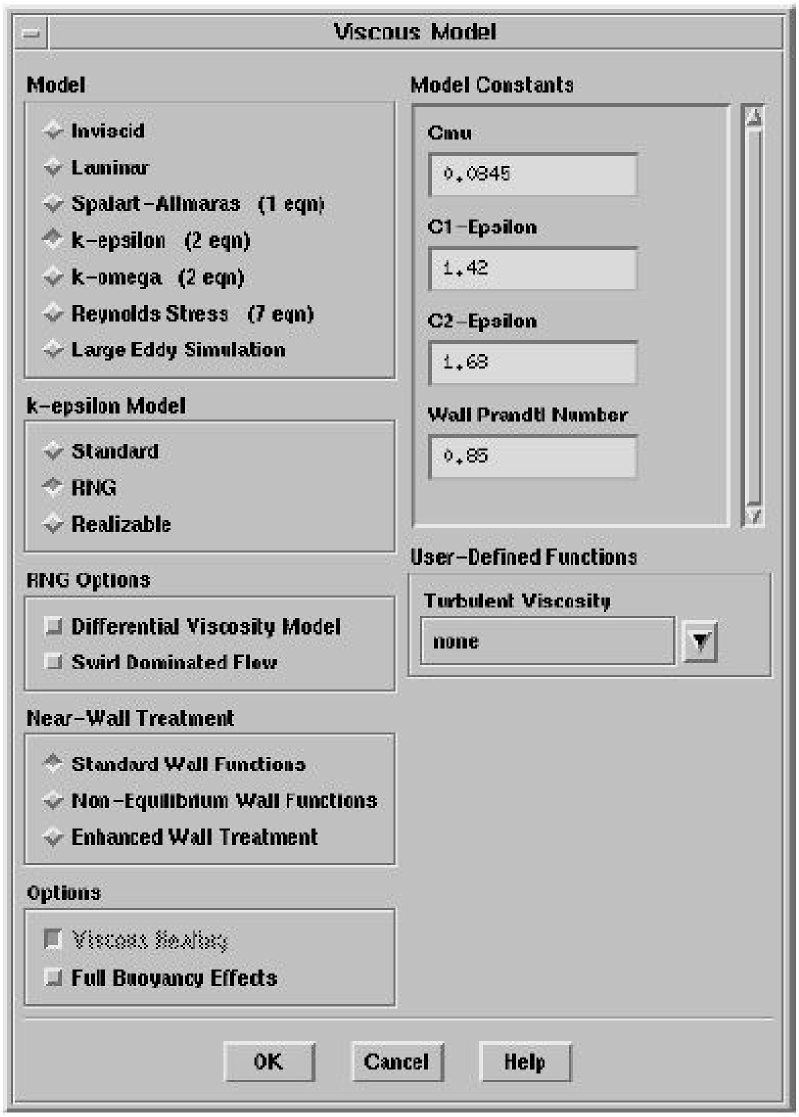


Figure 10.10.1: The Viscous Model Panel

2. 如果流动包括壁面，而你又使用的是一种 $k-\varepsilon$ 模型或是雷诺应力模型（RSM）的话，须从 Viscous Model 面板的 Near-Wall Treatment 框下面的三个选项中选一个：

- Standard Wall Functions

- Non-Equilibrium Wall Functions
- Enhanced Wall Treatment

这些近壁面选项在 10.8 节中有详细的描述。默认时，选择的是 Standard Wall Functions（标准壁面函数）。

对于 Spalart-Allmaras，$k-\varepsilon$ 和 LES 模型的近壁面处理是自动进行定义的，详情参见 10.3.6，10.5.1 和 10.7.3 节。

3. 激活 Viscous Model 面板中适当的湍流模型选项。详情参见 10.10.1 节。
4. 为求解变量指定边界条件。

   Define → Boundary Conditions...

   详见 10.10.2 节。
5. 为求解变量的初始化。

   Solve → Initialize → Initialize...

   详见 10.10.2 节。注意，雷诺应力利用 k 自动初始化，因此不需要我们再初始化。

10.10.1 湍流选项

湍流模型可用的不同的选项在 10.3 到 10.7 节已经详细的介绍过了。这里将提供这些选项的用法。

如果你选择的是 Spalart-Allmaras 模型，下列选项是有用的：

- Vorticity-based production（基于旋涡的产出）
- Strain/vorticity-based production（基于应变/旋涡的产出）
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）

如果你选择的是标准的 $k-\varepsilon$ 模型或是可实行的 $k-\varepsilon$ 模型，下列选项是有用的：

- Viscous heating（对耦合算法总是激活）
- Inclusion of buoyancy effects on ε（包含浮力对 ε 的影响）

如果你选择的是 RNG $k-\varepsilon$ 模型，下列选项是有用的：

- Differential viscosity model（微分粘性模型）
- Swirl modification（涡动修正）
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）
- Inclusion of buoyancy effects on ε（包含浮力对 ε 的影响）

如果你选择的是标准的 $k-\omega$ 模型，下列选项是有用的：

- Transitional flows
- Shear flow corrections
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）

如果你选择的是剪切-应力传输 $k-\omega$ 模型，下列选项是有用的：

- Transitional flows（过渡流）
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）

如果你选择的是雷诺应力模型（RSM），下列选项是有用的：

- Wall reflection effects on Reynolds stresses（壁面反射对雷诺应力的影响）
- Wall boundary conditions for the Reynolds stresses from the k equation（雷诺应力的壁面边界条件来自k方程）
- Quadratic pressure-strain model（二次的压力－应变模型）
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）
- Inclusion of buoyancy effects on ε（包含浮力对ε的影响）

如果你选择的是增强壁面处理（对$k-\omega$模型和雷诺应力模型可用），下列选项是有用的：

- Pressure gradient effects（压力梯度的影响）
- Thermal effects（热影响）

如果你选择的是大漩涡模拟（LES），下列选项是有用的：

- Smagorinsky-Lilly model for the subgrid-scale viscosity
- RNG model for the subgrid-scale viscosity
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）

Model Constants（模型常量）也是可以修改的，但是在绝大多数的应用中没有这个必要。有关这些常量的详细说明参见10.3到10.7节。注意，$C1-PS$和$C2-PS$分别是线性压力－应变近似公式（10.6-5）和（10.6-5）中的常数C_1和C_2，$C1'-PS$和$C2'-PS$分别是式（10.6-7）中的常数$C_1^{'}$和$C_2^{'}$。$C1-SSG-PS$，$C1'-SSG-PS$，$C2-SSG-PS$，$C3-SSG-PS$，$C3'-SSG-PS$，$C4-SSG-PS$和$C5-SSG-PS$分别是二次压力－应变近似公式（10.6-16）中的C_1，C_1^*，C_2，C_3，C_3^*，C_4和C_5。

包含粘性热影响

模型中包含有粘性热影响的问题参见11.2.1和11.2.2节。

包含由于浮力产生的湍流

如果你指定了一个非零的重力影响（在Operating Conditions面板下），而你的模型又是非等温流动的话，那么由浮力产生的湍流动能的产出将默认地总是被包含在k方程中。然而，FLUENT没有默认地将浮力的影响包含到ε方程中。

要想把浮力影响包含到ε方程中来，必须打开Viscous Model面板下的Full Buoyancy Effects（全浮力影响）选项。

该选项对三个$k-\varepsilon$模型和雷诺应力模型是有用的。

基于漩涡和基于应变/漩涡的产出

对于Spalart-Allmaras模型，可在Viscous Model面板下的Spalart-Allmaras选项框中选择Vorticity-Based Production（基于漩涡地产出）或者是Strain/Vorticity-Based Production（基于应变/漩涡地产出）。如果你选择了Vorticity-Based Production，FLUENT将使用式（10.3-8）计算变形张量S的值；如果选择的是Strain/Vorticity-Based Production，则采用式（10.3-10）来计算。

（如果没有激活Spalart-Allmaras模型，该选项框将不显示在面板中）

微分粘性修正

在FLUENT的RNG湍流模型中，有一个功能可以利用一个计算有效粘性μ_{eff}（式10.4-6）的微分公式来说明低雷诺数的影响。要激活该功能，须选中Viscous Model面板下的RNG选项框中的Differential Viscosity Model选项。

（如果没有激活RNG $k-\varepsilon$ 模型，该选项框将不显示在面板中）

涡动修正

一旦你选择了RNG模型，对于所有的三维流动和有涡流的轴对称流动，涡动修正将默认生效。默认的涡动常数（式10.4-8中的α_s）被设置为0.05，该值对于从微弱到适度的涡动流适用。对于强涡动流，需要使用更大的涡动常数。

要改变涡动常数的值，你必须首先选中Viscous Model面板下的RNG选项框中的Swirl Dominated Flow选项。（如果没有激活RNG $k-\varepsilon$ 模型，该选项框将不显示在面板中）

一旦选中Swirl Dominated Flow选项，涡动常量α_s将增大到0.07。你可以在Model Constants（模型常数）下面的Swirl Factor（涡动要素）栏中改变它的值。

过渡流

如果使用的是一种$k-\varepsilon$模型，你可以通过启动Viscous Model面板下k-omega选项框中的Transitional Flows选项，开启对湍流粘性的低雷诺数修正。默认情况下，该选项是不被选中的，并且衰减系数（式10.5-6中的α^*）等于1。

剪切流修正

在标准$k-\varepsilon$模型中，对预测自由剪切流，也有用以提高精度的修正选项。只要这些修正项包含在标准$k-\varepsilon$模型[267]当中，Viscous Model面板下k-omega选项框中的Shear Flow Corrections选项将默认地启动。当该选项启动时，FLUENT将利用式10.5-16和10.5-24计算 f_β^*和 f_β，若没有启动该选项， f_β^*和 f_β将被设置为1。

含有压力梯度影响

如果使用增强壁面处理，你可以通过启动Enhanced Wall Treatment Options框中的Pressure Gradient Effects选项，将压力梯度的影响包括进来。当此选项被选中，FLUENT将把式10.8-33中的系数α包含进来。

含有热影响

如果使用增强壁面处理，你可以通过启动Enhanced Wall Treatment Options框中的Thermal Effects选项，将热影响包括进来。当此选项被选中，FLUENT将把式10.8-33中的系数β包含进来。当Thermal Effects选项被选中，如果在Materials面板中给流体密度选择的是理想气体规则的话，那么式10.8-33中的γ也被包括了进来。

含有壁面反射项

如果压力应变的默认模型使用的是雷诺应力模型，FLUENT将默认地把压力应变项中的壁面反射影响包含进来。就是说，FLUENT将利用式10.6-7计算ϕ_{ij}^{w}，并将其包含到10.6-4式中。注意，如果你已经选择的是二次压力应变模型，将不包括壁面反射影响。

在计算ϕ_{ij}^{w}中使用的经验常数和函数f是在一些简单规范的流动中校核的，如管道流动和有单一壁面的平板边界层。如果流动有多个壁面并且壁面曲率很大（例如，一个轴对称管或曲管），式10.6-7中包含的壁面反射项将不可能提高雷诺应力模型预测的精度。在这种情况下，你可以关闭Viscous Model面板下Reynolds-Stress Options选项框中的Wall Reflection Effects选项，以取消壁面反射影响。

求解k方程以获得壁面边界条件

在雷诺应力模型中，FLUENT默认地用10.6-28式计算的值，为壁面附近的雷诺应力采用显式的边界条件设定。通过求解k方程计算k，这里的k方程是对法向应力方程10.6-1求和得到的。要取消这一功能，改采用式10.6-29给出的壁面边界条件，需要从Viscous Model面板下Reynolds-Stress Options选项框中的k Equation中关闭Wall B.C.选项。（如果没有激活RSM模型，该选项框将不显示在面板中）

二次压力应变模型

要使用10.6.3节中所描述的二次压力应变模型，须开启Viscous Model面板下Reynolds-Stress Options选项框中的Quadratic Pressure-Strain Model选项。（如果没有激活RSM模型，该选项框将不显示在面板中）当选中了Quadratic Pressure-Strain Model，下列选项将是不可用的：

- Reynolds-Stress Options选项框下面的Wall Reflection Effects项
- Near-Wall Treatment选项框下面的Enhanced Wall Treatment项

亚网格比例模型

如果选择了大漩涡模拟（LES）模型，你将可以选用在10.7.2中介绍过的两种亚网格比例模型。你既可以选择Smagorinsky-Lilly亚网格比例模型，也可以选择RNG亚网格比例模型。

（如果没有激活LES模型，该选项框将不显示在面板中）

定制湍流粘性

如果你正在使用Spalart-Allmaras、$k-\varepsilon$、$k-\omega$或者是LES模型，可以使用一个用户自定义函数来定制湍流粘性。Spalart-Allmaras、$k-\varepsilon$和$k-\omega$模型，以及LES模型中完全一体化的新亚网格模型，在以上这些情况下该项功能让你可以修改μ_t。用户定义函数的相关内容参见单独的用户定义函数手册。

在Viscous Model面板的User-Defined-Functions栏中有个Turbulent Viscosity下拉表，在这里选择恰当的用户定义函数。

10.10.2　定义湍流边界条件

$k-\varepsilon$　模型和$k-\omega$模型

当你在FLUENT中，使用一个$k-\varepsilon$模型或一个$k-\omega$模型，模拟湍流流动时，除了其他的一些普通的求解变量之外，你还必须为k和ε（或k和ω）提供边界条件。在壁面的k和ε的边界条件是由FLUENT内部维护的，不需要用户输入。你必须提供给FLUENT的k和ε（或k和ω）的边界条件的输入是在入口的边界（进口速度，进口压力等等）。在许多情况下，指定正确的或者逼真的进口边界条件是很重要的，因为进口的湍流能极大地影响下游的流动。

有关指定k和ε（或k和ω）进口边界条件的详情参见6.2.2节。

你可以通过选择壁面边界将壁面地粗糙度考虑进来。在这种情况下，你能够在面板中为相应的壁面边界指定粗糙度参数（粗糙度最值和粗糙度常数）。（参见6.13.1节）

Spalart-Allmaras 模型

当你在FLUENT中，使用Spalart-Allmaras模型模拟湍流流动时，除了其他的一些普通的求解变量之外，你还必须为$\bar{v}$提供边界条件。在壁面的$\bar{v}$的边界条件是由FLUENT内部维护的，不需要用户输入。你必须提供给FLUENT的$\bar{v}$的边界条件的输入是在入口的边界（进口速度，进口压力等等）。在许多情况下，指定正确的或者逼真的进口边界条件是很重要的，因为进口的湍流能极大地影响下游的流动。

有关指定$\bar{v}$进口边界条件的详情参见6.2.2节。

你可以通过选择壁面边界将壁面地粗糙度考虑进来。在这种情况下，你能够在面板中为相应的壁面边界指定粗糙度参数（粗糙度最值和粗糙度常数）。（参见6.13.1节）

雷诺应力模型

除了流体流进的那个边界以外，雷诺应力模型所有的边界的湍流边界条件的说明和其他湍流模型的完全一样。对于这些边界还可用另外的输入方法，在这里将进行介绍。

当你选择使用了雷诺应力模型，其所必须的缺省进口边界条件输入和选用$k-\varepsilon$模型时是同样的。你可以使用6.2.2节中所介绍的任何湍流说明方法来输入湍流量。然后，FLUENT将根据湍流的各向同性假设，利用指定的湍流量来得到进口处的雷诺应力：

$$\overline{u_i^{'2}} = \frac{2}{3}k \qquad (i = 1,2,3) \qquad (10.10\text{-}1)$$

$$\overline{u_i^{'}u_j^{'}} = 0.0 \qquad (10.10\text{-}2)$$

在这里，$\overline{u_i^{'2}}$是每个方向上的法向雷诺应力。ε的边界条件的确定方式和$k-\varepsilon$湍流模型（见6.2.2节）一样。使用这种方法，利将要从K和Turbulence Intensity（湍流强度）中选择一个作为在边界条件面板中的Reynolds-Stress Specification Method（雷诺应力的指定方法）。

你可以通过选择Reynolds-Stress Components（雷诺应力的构成）作为在边界条件面板中的Reynolds-Stress Specification Method（雷诺应力的指定方法），来直接指定雷诺应力。当此选项被开启，你应当直接输入雷诺应力。

可以通过使用常数值、坐标断面函数（见6.25节）或者用户定义函数（见单独的用户定义函数手册）来设置雷诺应力。

大漩涡模拟模型

只有在进口速度边界条件选定的入口才可能指定速度成分的任意波动的数量级。这种情况下，必须指定一个Turbulence Intensity（湍流强度），以确定单个的平均速度成分（见10.7.3节）的任意扰动的数量级。LES的边界条件，除了进口速度以外，均保持和薄片流动完全一样。

10.10.3 k 和 ε（或 k 和 ω）的初始化

对了使用某种 $k-\varepsilon$ 模型或是某种 $k-\omega$ 模型或是雷诺应力模型的流体，其收敛解或是（对不稳定计算的）花了足够长时间后的解应该和 k 和 ε（或 k 和 ω）的初始值无关。然而，为了更好的收敛，给 k 和 ε（或 k 和 ω）一个合理的初始值是有益的。

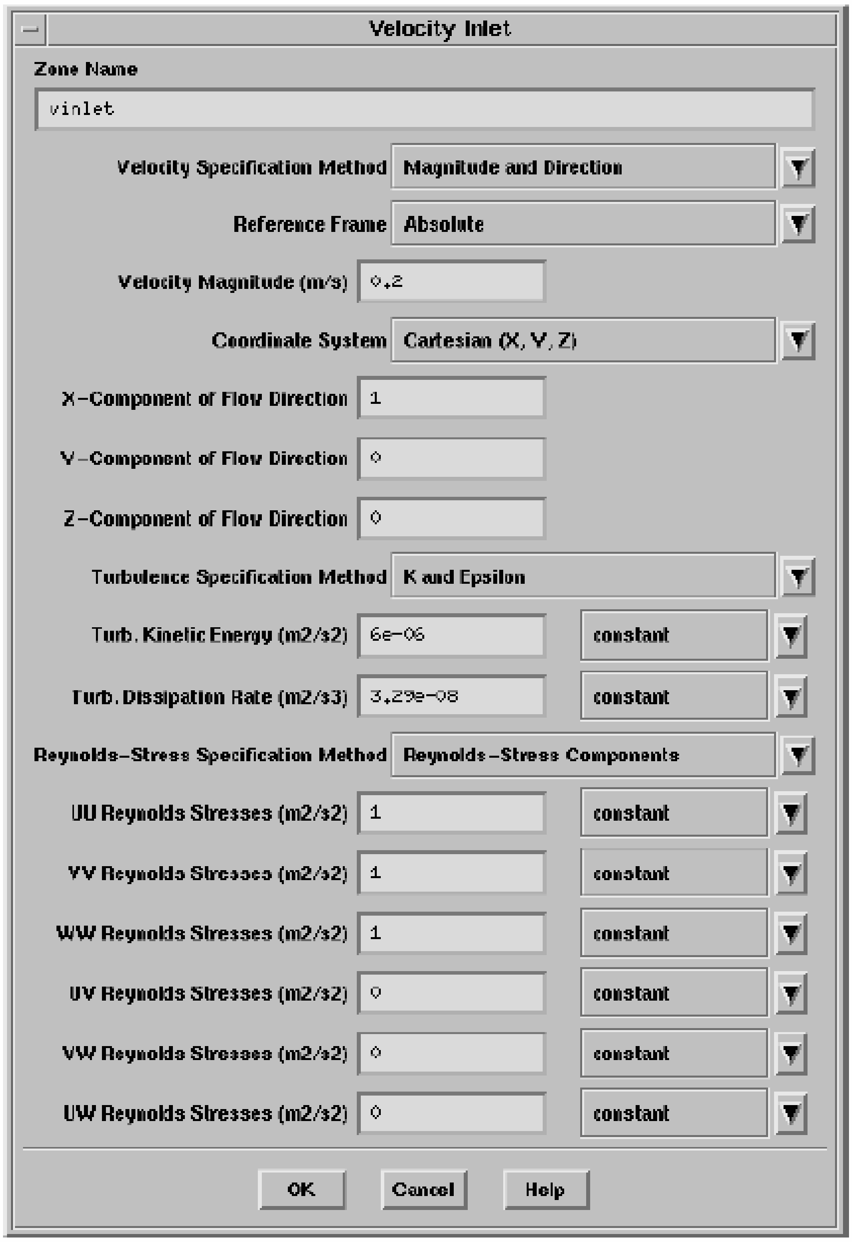


Figure 10.10.2: Specifying Inlet Boundary Conditions for the Reynolds Stresses

一般而言，推荐从湍流的充分发展状态开始计算。当你为 $k-\varepsilon$ 模型或是雷诺应力模型

采用了增强壁面处理时，指定充分发展的湍流区显得尤为重要。这里给出下列指导方针。

- 如果能够在进口处指定合理的边界条件，那么可以通过这些边界值来计算整个区域内的k和ε（或k和ω）的初始值。
- 对于更多的复杂流动（例如，有多个不同条件的进口的流动），根据湍流强度来指定初始值可能更好一些。表征充分发展的湍流5-10%已经足够了。然后，可以通过湍流强度和你的问题中特有的平均速度大小来计算出k（$k=1.5(Iu_{avg})^2$）。

  应该为ε指定一个初始预测值，以使得作为涡流粘性（$C_\mu k^2/\varepsilon$）的结果与分子粘性相比是足够的大。在充分发展的湍流中，湍流粘性大概比分子粘性大两个数量级。根据这个，可以计算ε。

注意，对于雷诺应力模型，雷诺应力利用10.10-1和10.10-2式自动初始化。

10.11　湍流流动模拟的求解策略

与薄片状流动相比，湍流流动模拟在很多方面更加复杂。对于平均雷诺数方法，要为湍流量求解额外的方程。一旦平均数量和湍流量（μ_t、k、ε、ω和雷诺应力）的方程被结合成一个高度非线性型，获得湍流的收敛解要比获得薄片状流动的收敛解付出更多的计算量。LES模型，当具体到一个对亚网格比例粘性的代数模型时，需要一个在高质量网格下的瞬时解。

湍流流动的结果的逼真度在很大程度上取决于采用的湍流模型。这里给出一些指导，使你能够提高你湍流流动模拟的质量。

10.11.1　网格的生成

当你为你的湍流流动模拟生成网格时务必遵循以下建议：

- 考虑一个相似流动状态的任何资料或利用你本身的直觉，将流动描绘在你的脑子里，确定你想要模拟的流体中所期望的主要流动特征。生成一个能求解所期望的主要特征的网格
- 如果流动是有壁面边界的，壁面会极大的影响流动，在生成网格时要格外小心。应该避免使用太好（对壁面函数方法）或太粗劣（对增强函数处理方法）的网格。详情参见10.9节。

10.11.2　精度

下面给出的建议有助于你的结果获得更好的精度：

- 选择使用对流动中你所期望看到的突出特性更适合的湍流模型（见10.2节）。
- 因为湍流流动中的平均数量与薄片状流动相比有更大的梯度，推荐为对流项使用高阶方案。如果你采用三角形或四面体网格，这一点显得尤为正确。注意，过多的数字扩散会影响解的精度，即使采用最精细的湍流模型。
- 在一些含有进口边界的流动状态中，进口的下游流动受进口处的边界条件支配。在这种情况下，应当注意确信指定适度的实际边界值。

10.11.3　收敛性

下面给出的建议有助于提高湍流流动计算的收敛性：

- 如果使用过分粗劣的初始值开始计算，可能导致解的发散。有一个保险的方法，就是采用保守的（小的）松弛因子和（对于耦合求解）一个保守的Courant数开始计算，然后，随着迭代的进行和解的稳定再逐渐地增大它们的值。
- 用合理的k和ε（或k和ω）的初始值开始计算也有助于更快的收敛。尤其当使用增强壁面处理时，从一个充分发展的湍流域开始计算是很重要的，正如在10.10.3节中所建议的，要避免用额外的迭代去发展湍流域。
- 在使用RNG $k-\varepsilon$模型时，有一个可以得到更好的收敛的方法，就是在转变成RNG $k-\varepsilon$模型以前采用标准的$k-\varepsilon$模型进行求解。由于在RNG $k-\varepsilon$模型中附加的非线性，可能需要更低的松弛因子和（对耦合求解）更低的Courant数。

注意，当使用增强壁面处理时，在计算过程中你可能有时候会发现ε的误差被报告为0。当你的流体在整个流动区域内的Re_y少于200，并且是通过代数公式（式10.8-24）而不是利用迁移方程来得到ε时，将会发生这种情况。

10.11.4　雷诺应力模型的特殊求解策略

利用雷诺应力模型，在动量方程和流体中的雷诺应力之间，创建一个高度的耦合，因而，其在计算上与比$k-\varepsilon$模型相比有更多的稳定性和收敛性方面的困难。故，当你使用雷诺应力模型时，为了获得收敛解可能需要一些特殊的求解策略。以下为推荐策略：

- 使用标准$k-\varepsilon$模型开始计算。打开雷诺应力模型，并使用$k-\varepsilon$解的数据作为雷诺应力模型计算的起始点。
- 对高度的涡动流或高度复杂的流动使用低的松弛因子和一个低的Courant数。在这些情况下，可能需要为速度和所有的应力降低松弛因子。

下面提供了设置这些求解参数的说明。如果使用雷诺应力模型来预测一个高度的涡动流，还应该考虑8.4节中讨论的求解策略。

雷诺应力的低松弛

FLUENT对雷诺应力应用了低松弛。你可以利用Solution Controls面板设置低松弛因子。

Solve → Controls → Solution…

对绝大多数实例推荐使用默认设置0.5。当雷诺应力模型开始收敛了，你可以增大这些值以加快收敛速度。

取消雷诺应力的计算修正

在一些例子中，你可能希望让当前的雷诺应力区保持固定，在解其它迁移方程时，不解雷诺迁移方程。你可以在Solution Controls面板中开启/关闭所有的雷诺应力方程。

Solve → Controls → Solution…

雷诺应力模型的误差报告

当为湍流流动使用雷诺应力模型时，FLUENT将对单个的雷诺应力迁移方程报告方程的误差。你可以对雷诺应力误差应用一贯的收敛标准：在10^{-3}范围内的标准化误差通常预示着一个实际的收敛解。然而，要确信完全收敛，可能需要更严格的收敛标准。

10.11.5 LES模型的特殊求解策略

LES涉及对一个适当的网格，使用合适的步长，从一些初始条件中计算一个瞬时解。这个解必须是运行足够长时间后变得与初始条件无关，并且能够确定流动区域的统计资料。

计算LES要遵循以下建议：

1. 开始时，假定为薄片状流动计算流动仿真，或使用一个诸如标准$k-\varepsilon$或Spalart-Allmaras的简单的平均雷诺湍流模型。由于这是唯一的初始条件，你需要执行直到流动区域开始收敛。这一步是可选的。
2. 当开启了LES模型，FLUENT将自动打开非定常求解选项，并选择二次的隐式公式。你需要设置恰当的步长和必要的求解参数。（瞬时计算的求解参数设置的指导方针参见22.15.1节）对所有方程使用中心差分的空间离散方案。
3. 计算LES直到流动变得统计地稳定。检查流动是否完全发展并统计稳定地最好方法是监控流动中选定位置的力和求解变量（例如：速度成分或压力）。
4. 使用求解/初始化/初始流动统计文本命令输出初始统计资料。在重新求解前，开启Iterate面板中的Time Statistics下的Data Sampling选项（将在22.15.1节进行介绍）。
5. 重复计算直到你得到统计地稳定数据。通过估计在解的范围内平均流动滞留时间（L/U，L是解范围的特征长度，U是特征平均流动速度）预先确定模拟的持续时间。

下面提供了设置LES求解参数的说明。

时间的离散化

FLUENT提供了一次和二次的时间离散。对于LES建议采用二次离散。

Define → Models → Solver…

空间的离散化

应该避免象一次回流这样的过度分散的方案和幂规则方案，因为它们可能会过度地减弱被求解漩涡地能量。当你使用LES模型时，推荐对所有地方程使用中心差分方案。

Solve → Controls → Solution…

10.12 湍流流动的后处理

FLUENT为陈列、绘制和报告各种各样的湍流量（包括主要的求解变量和其他一些辅助量）提供了后处理功能。

$k-\varepsilon$模型可以被报告的湍流量如下：

- 湍流的动能（k）

- 湍流强度
- 湍流耗散率（Epsilon）
- 湍流动能的产出
- 湍流粘性
- 有效粘性
- 湍流粘性比
- 有影响的热传导
- 有效的普朗特数
- Wall Yplus
- Wall Ystar
- 湍流雷诺数（Re_y）(仅当为近壁面处理使用增强壁面处理时)

$k-\omega$ 模型可以被报告的湍流量如下：

- 湍流的动能（k）
- 湍流强度
- 单位耗散率（Omega）
- 湍流动能的产出
- 湍流粘性
- 有效粘性
- 湍流粘性比
- 有效的热传导
- 有效的普朗特数
- Wall Yplus
- Wall Ystar

Spalart-Allmaras模型可以被报告的湍流量如下：

- 修正后的湍流粘性
- 湍流粘性
- 有效粘性
- 湍流粘性比
- 有效的热传导
- 有效的普朗特数
- Wall Yplus

雷诺应力模型可以被报告的湍流量如下：

- 湍流的动能
- 湍流强度
- UU雷诺应力
- VV雷诺应力
- WW雷诺应力
- UV雷诺应力

- VW雷诺应力
- UW雷诺应力
- 湍流耗散率（Epsilon）
- 湍流动能的产出
- 湍流粘性
- 有效粘性
- 湍流粘性比
- 有效的热传导
- 有效的普朗特数
- Wall Yplus
- Wall Ystar
- 湍流雷诺数（Re_y）

LES模型可以被报告的湍流量如下：

- 亚网格湍流动能
- 亚网格湍流粘性
- 亚网格有效粘性
- 亚网格湍流粘性率
- 有效的热传导
- Wall Yplus

所有的这些变量都可以在后处理面板的变量选择下拉列表的目录中找到。它们各自的定义参见第27章。

10.12.1 湍流的自定义域函数

除了上面所列出的量以外，你还可以利用Custom Field Function Calculator面板定义你自己的湍流量。

Define ⟶ Custom Field Functions…

下列函数可能是有用的：

- 湍流能量的产出与耗散之比（$G_k / \rho\varepsilon$）
- 平均流与湍流时间尺度之比η（$\equiv Sk / \varepsilon$）
- 由Boussinesq公式都到的雷诺应力（例如：$-\overline{uv} = \nu_t \dfrac{\partial u}{\partial y}$）

10.12.2 LES的后处理统计

正如10.7节所介绍的，LES涉及求解一个瞬时流动区域，但是它是平均流动量。如果开启Iterate面板下Time Statistics选项框中的Data Sampling选项，当处理LES时，FLUENT将为时间统计收集数据。这样，你既可以在FLUENT中看到平均值，也可以看到均方根值。相见22.15.3节。

10.12.3 发现并解决故障

进行后处理不仅仅是为了说明结果，还可以调查在解中可能出现的任何异常。例如，可以通过描绘 k 的等高线来检查是否存在某个区域的 k 错误地偏大或偏小。可以列出湍流粘性比，看看湍流是否完全生效。对于利用RANS方法（也就是说，不是使用LES模型）构造的完全发展的湍流流动模型，通常湍流粘性至少要比分子粘性大两个数量级。还可以看出你为增强壁面处理使用的近壁面网格是否合适。在这种情况下，你可以将 Re_y（湍流雷诺数）的等高线覆盖到网格上显示出来。

译文说明

- 本文依据 FLUENT6.0 的 HELP 文件翻译而成。事先并未征得原文版权所有者 FLUENT 公司或其在中国代理人海基公司的同意。
- 本文的写作目的仅在于为在教育与科研领域从事研究工作的人员提供参考与帮助，无意于将其用于商业目的。
- 对本文在教育与科研领域的转移、存储、复制，本文作者不提供基于任何商业目的或有损于原文版权所有者的利益、形象等权益的帮助或便利。
- 对出于研究与教学目的人员或机构，中文翻译者愿意并尽其可能的提供帮助、商议或回应其它形式的要求。
- 一旦原文（英文）版权所有者对中文译文的发布提出异议并明确通知译文作者，同时援引有效、适用的法律、法规条款，译文作者愿意立刻终止其为本文的发布、传播而所做出的一切形式努力。

注：本文以 ADOBE 公司的 PDF 格式发布。如需要相应中文 WORD 格式文档，请发邮件到 west_wing@sohu.com.

11. Modeling Heat Transfer 传热模拟

- 11.1 Overview of Heat Transfer Models in **FLUENT** FLUENT 中的传热模型概述
- 11.2 Convective and Conductive Heat Transfer 导热与对流换热
  - 11.2.1 Theory 理论
  - 11.2.2 User Inputs for Heat Transfer 有关传热的用户输入项
  - 11.2.3 Solution Process for Heat Transfer 传热计算的求解过程
  - 11.2.4 Reporting and Displaying Heat Transfer Quantities 传热变量的输出与显示
  - 11.2.5 Exporting Heat Flux Data 热流数据的输出
- 11.3 Radiative Heat Transfer 辐射传热
  - 11.3.1 Introduction to Radiative Heat Transfer 辐射传热简介
  - 11.3.2 Choosing a Radiation Model 选择辐射模型
  - 11.3.3 The Discrete Transfer Radiation Model (DTRM) 离散传播辐射模型
  - 11.3.4 The P-1 Radiation Model P-1 辐射模型
  - 11.3.5 The Rosseland Radiation Model Rosseland 辐射模型
  - 11.3.6 The Discrete Ordinates (DO) Radiation Model 离散坐标辐射模型
  - 11.3.7 The Surface-to-Surface (S2S) Radiation Model 多表面辐射传热模型
  - 11.3.8 Radiation in Combusting Flows 燃烧过程的辐射
  - 11.3.9 Overview of Using the Radiation Models 辐射模型使用概览
  - 11.3.10 Selecting the Radiation Model 辐射模型的选择
  - 11.3.11 Defining the Ray Tracing for the DTRM 离散传播模型的跟踪射线的定义
  - 11.3.12 Computing or Reading the View Factors for the S2S Model 表面辐射模型中角系数的计算与数据读取
  - 11.3.13 Defining the Angular Discretization for the DO Model DO 辐射模型离散角的定义
  - 11.3.14 Defining Non-Gray Radiation for the DO Model 离散坐标辐射模型中的非灰体辐射
  - 11.3.15 Defining Material Properties for Radiation 有关辐射性能的材料属性定义
  - 11.3.16 Setting Radiation Boundary Conditions 辐射边界条件设定
  - 11.3.17 Setting Solution Parameters for Radiation 辐射计算参数的设定
  - 11.3.18 Solving the Problem 问题求解过程
  - 11.3.19 Reporting and Displaying Radiation Quantities 辐射变量的和输出与显示
  - 11.3.20 Displaying Rays and Clusters for the DTRM DTRM 表面束和射线显示
- 11.4 Periodic Heat Transfer 周期性传热问题
  - 11.4.1 Overview and Limitations 概述与适用范围

- 11.4.2 Theory 理论
- 11.4.3 Modeling Periodic Heat Transfer 周期性传热问题的模拟
- 11.4.4 Solution Strategies for Periodic Heat Transfer 周期性传热问题求解策略
- 11.4.5 Monitoring Convergence 监视收敛
- 11.4.6 Postprocessing for Periodic Heat Transfer 周期性传热问题的后处理

- 11.5 Buoyancy-Driven Flows 浮力驱动流动
  - 11.5.1 Theory 理论
  - 11.5.2 Modeling Natural Convection in a Closed Domain 封闭区域内自然对流的模拟
  - 11.5.3 The Boussinesq Model Boussinesq 模型
  - 11.5.4 User Inputs for Buoyancy-Driven Flows 浮力驱动流动的用户输入
  - 11.5.5 Solution Strategies for Buoyancy-Driven Flows 浮力驱动流动的求解策略
  - 11.5.6 Postprocessing for Buoyancy-Driven Flows 浮力驱动流动的后处理

11.1 FLUENT 中的传热模型概述

占据一定体积的物质所据有的热能从一处转移到另一处，这种现象称为传热。引发传热的原因有三种：导热、对流传热、辐射传热。只涉及热传导或／和对流的传热过程是最简单的情况，而涉及到浮力驱动流动或者自然对流、辐射的传热过程却比较复杂。依据问题的不同，FLUENT 求解不同的能量方程以考虑用户设定的传热模型。FLUENT 也可以预报出具有周期对称性几何结构所对应的周期性传热，这样就可以大大减少计算量。

11.2 导热与对流换热

FLUENT 允许用户在其模型中包含有流体与 / 和固体的传热求解。从流体热混合到固体的热传导可以在 FLUENT 中应用这一节所介绍的模型和用户输入项进行耦合求解。11.3 节介绍辐射传热模型、11.5 节介绍自然对流。

- 11.2.1 Theory
- 11.2.2 User Inputs for Heat Transfer
- 11.2.3 Solution Process for Heat Transfer
- 11.2.4 Reporting and Displaying Heat Transfer Quantities
- 11.2.5 Exporting Heat Flux Data

11.2.1 理论

能量方程

FLUENT 求解如下的能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\nabla\bullet\left(\vec{v}(\rho E+p)\right)=\nabla\bullet\left(k_{eff}\nabla T-\sum h_j\vec{J}_j+\left(\overline{\overline{\tau}}_{eff}\bullet\vec{v}\right)\right)+S_h \qquad (11.2.1)$$

其中，k_{eff} 为有效导热率（$k+k_{eff}$，其中，k_f 为湍流引致的导热率，由模型中使用的湍流模型确定）。$\vec{J}_j$ 为组分 j 的扩散通量。方程 11.2-1 右边的前三项分别表示由于热传导、组分扩散、粘性耗散而引起的能量转移。S_h 包含化学反应放（吸）热以及任何其它的由用户定义的体积热源。

方程 11.2-1 中：

$$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{v^2}{2} \qquad (11.2.2)$$

其中，显焓 h 的定义（对理想气体）为：

$$h=\sum_j Y_j h_j \qquad (11.2.3)$$

对不可压流体：

$$h=\sum_j Y_j h_j+\frac{p}{\rho} \qquad (11.2.4)$$

方程 11.2-3、11.2-4 中，Y_j 为组分 j 的质量分数：

$$h_j=\int_{T_{ref}}^{T} c_{p,j}\,dT$$

其中 T_{ref} 为 298.15K。

非预混燃烧模型的能量方程：

当激活非绝热、非预混燃烧模型时，FLUENT 求解以总焓表示的能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial}(\rho H)+\nabla\cdot(\rho\vec{v}H)=\nabla\cdot\left(\frac{k_t}{c_p}\nabla H\right)+S_h \qquad (11.2.6)$$

上式假定刘易斯数（Le）=1，方程右边的第一项包含热传导与组分扩散，粘性耗散作为非守恒形式被包含在第二项中。总焓的定义为：

$$H=\sum_j Y_j H_j$$

其中，Y_j 为组分 j 的质量分数：

$$H_j=\int_{T_{ref,j}}^{T} c_{p,j}dT+h_j^0\left(T_{ref,j}\right) \qquad (11.2.8)$$

$h_j^0\left(T_{ref,j}\right)$ 为组分 j 处于参考温度 $T_{ref,j}$ 的生成焓。

考虑压力做功以及动能

方程 11.2-1 包含有在不可压流动中经常被忽略的压力做功和动能。因此，在缺省情况下，分离式求解器在计算不可压流体时，不考虑压力做功和动能的影响。如果用户希望考虑这两个因素，可以使用 define/models/energy?命令行激活这两个影响因素。在处理可压缩流动或使用任何耦合式求解器时，总是考虑压力做功和动能。

考虑粘性耗散

方程 11.2-1 和 11.2-6 包含有粘性耗散项，它表示了由于流动过程中粘性剪切作用而产生的热量。

在使用分离式求解器时，FLUENT 的缺省能量方程不包含这一项（因为一般灰忽略粘性产生的热量）。当 Brinkman 数，Br，接近或大于 1 时，流体粘性生成的热量不可忽视：

$$Br=\frac{\mu U_e^2}{k\Delta T} \qquad (11.2.9)$$

其中，ΔT 为计算区域内的温差。

当用户的问题需要考虑粘性耗散项，并且使用的是分离式求解器时，用户应该在 **Viscous Model** panel 面板中使用 **Viscous Heating** 选项激活此项。对于一般的可压缩流动，$Br\geq 1$。需要注意的是，如果用户已经定义了可压缩流动，但使用了分离式求解器，FLUENT 不会自动激活粘性耗散选项。

对于任一种耦合式求解器，在求解能量方程时，粘性耗散项总是被考虑进去。

考虑组分扩散项：

由于组分扩散的作用，方程 11.2-1、11.2-6 均包含有焓的输运。

当使用分离式求解器时，此项：

$$\nabla\cdot\left(\sum_j h_j\vec{J}_j\right)$$

在缺省情况下被包含在方程 11.2-1 中。若用户希望禁止此项，可以使用 **Species Model** panel. 面板中的 **Diffusion Energy Source** 选项来屏蔽。

在使用非绝热、非预混燃烧模型时，因为方程 11.2-6 中的第一项中已经包含了这一项，所以它不会显式的包含在方程中。

使用耦合式求解器时，这一项总是被包含在能量方程中。

化学反应引起的传热源项

方程 11.2-1 中的能量源项包含化学反应带来的热量；

$$S_{h,rxn} = -j\sum_j \left(\frac{h_j^0}{M_j} + \int_{T_{ref,j}}^{T} c_{p,j} dT \right) \Re_j \qquad (11.2.10)$$

其中，h_j^0 为组分 j 的生成焓，$\Re_j$ 为组分 j 的体积释热率。

对于非绝热、非预混燃烧模型的能量方程（方程 11.2-6），由于组分生成热已经被包含在焓的定义之中（请参阅方程 11.2-6），所以，能量的反应源项不包含在源项 S_h 之中。

辐射引起的能量源项

一旦使用了某种辐射模型，方程 11.2-1、11.2-6 中的源项 S_h 也包含有辐射源项。细节请参阅 11.3 节。

相间能量交换源项

需要指出的是，能量源项 S_h 中也包含连续相与离散相之间的热量交换。进一步的讨论请参阅 19.5 节。

壁面传热边界条件

壁面传热边界条件在 10.8.2 节介绍。

固体计算域的能量方程

在固体区域，FLUENT 使用的能量方程形式如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v}\rho h) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_h \qquad (11.2.11)$$

其中：

$\rho =$ 密度

$h =$ 显焓，$\int_{T_{ref}}^{T} c_p dT$

$k =$ 导热率

$T =$ 温度

$S_h =$ 体积热源

方程 11.2-11 左边第二项表示固体由于旋转或平移而引起的对流传热。速度 $\vec{v}$ 由用户对固体区域的运动属性的设定而计算得到（请参阅 6.18 节）。方程 11.2-11 右边两项分别表示传导引起的热流以及固体内部的体积热源。

固体内各向异性热传导

当使用分离式求解器时，FLUET 允许用户对固体介质设定各向异性的导热率。对于各向异性导热的 ，其热传导项为：

$$\nabla \cdot (k_{ij}\nabla T) \qquad (11.2.12)$$

其中，为 k_{ij} 导热率张量。关于如何对固体设定各向异性导热率，请参阅 7.4.5 节。

入口区的扩散

在入口区的总能量输运既包括对流传热，也包括扩散传热。对流传热由用户设定的入口温度所确定。但是，扩散传热却依赖于计算域中的温度梯度。这样，我们不能预先设定扩散传热量，从而就不能确定入口的总传热量。

在某些场合，用户可能希望给定入口的中传热量而不是入口温度。如果使用分离式求解器，用户可以禁止掉入口的能量扩散来达到此目的。缺省情况下，在入口区，FLUENT 包含有扩散传热。为了禁止入口的扩散传热，可使用 define/models/energy?命令行。

如果使用耦合式求解器，那么，入口区的扩散传热不能禁止掉。

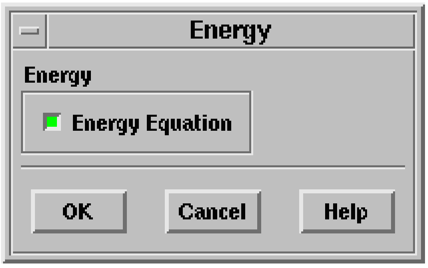
11.2.2 有关传热的用户输入项

在 FLUENT 中使用的模型考虑传热时，用户需要激活相应的模型、提供热边界条件、给出控制传热和／或依赖于温度而变化的各种介质参数。这一节介绍这些输入项。

设定传热问题的步骤如下所述（需要注意的是，这里介绍的只包括针对传热而必须的设定步骤，用户还需要设定其它的模型参数、边界条件等）。

1. 为了激活传热计算，请在 **Energy** panel 面板（图 11.2.1）中激活 **Energy Equation** 选项。

   Define →Models →Energy...



图表 11.2.1 **Energy** 面板

2. 如果模拟的是粘性流动，并且希望在能量方程中包含粘性生成热，请在 **Viscous Model** panel.面板中激活 **Viscous Heating** 选项（可选的，且仅适用于离散求解器，）。正如 11.2.1 节所介绍的，在使用离散求解器时，缺省情况下，FLUENT 在能量方程中忽略了粘性生成热（各个耦合求解器总是包含有粘性生成热）。对于流体剪切应力较大（例如流体润滑问题），和／或高速可压缩流动（请参阅方程 11.2-9），用户应该考虑粘性耗散。

   Define →Models →Viscous...

3. 在流动入口、出口以及壁面定义热边界条件

   Define →Boundary Conditions...

   在入口、出口边界用户应设定温度条件；在壁面，用户可以设定如下的热边界条件：

   - 设定热流
   - 设定温度
   - 对流传热条件
   - 辐射条件
   - 辐射与对流的混合边界

6.13.1 节详细介绍了决定上述热边界条件所需要的模型输入参数。入口的缺省热边界条件为温度＝300K；壁面的缺省热边界条件为热流＝0（即壁面绝热）。关于边界条件输入参数的细节请参阅第六章。

!! 若用户的传热计算涉及到两个彼此分离的流动区域，请看下面的介绍。

4. 定义介质的热参数

Define → Materials...

必须定义介质的比热和导热率，并且用户可以把很多参数设定为温度的函数（请参阅第七章）。

!! 若用户的传热计算涉及到两个彼此分离的流动区域，请看下面的介绍。

温度的高限与低限值

出于计算稳定性的考虑，FLUENT 对温度的计算范围加以限制。设定温度的高低限是为了提高计算的稳定性，因为物理上真实的温度应该处于某个确定的温度范围之内。有时，在方程求解刚开始时，温度可能会超出温度限制，而异常温度所对应的各种参数将是不真实的。温度的高 / 低限值确保了计算出的温度处在用户所期望的可能的温度范围之内。如果 FLUENT 在计算过程中得到的温度超出了温度高限，那么，计算温度值就被固定在温度高限上。缺省的温度高限值是 5000K。若 FLUENT 在计算过程中得到的温度低于温度低限，那么，计算温度值就被固定在温度低限上。缺省的温度低限值为 1K。

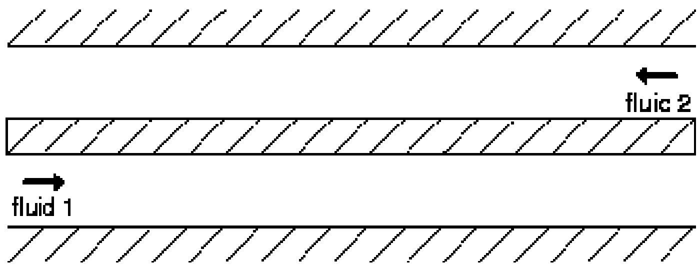
若用户计算域内的温度可能超过 5000K，那么，可以使用 **Solution Limits** panel 面板的 **Maximum Temperature**.选项来提高温度高限值。

Solve → Controls → Limits...

模拟分离的两个区域内的传热

如果用户的传热计算域涉及到由固体区域或某个壁面分开的两个流动区域（如图 11.2.2 所示），那么，就需要仔细的设定此计算模型：

- 在任一个流动区域都不能使用 outflow 边界条件
- 通过对每个计算域设定不同的流体介质，用户可以创建单独的流体介质属性（但是，对于需要组分计算的情况，用户只能对整个计算域设定一个单一的混合介质）。



图表 2 涉及到两个彼此分离流动的典型逆流换热

11.2.3 传热计算的求解过程

尽管使用 FLUENT 中预先设定的缺省求解参数可以很好的求解简单传热问题，用户可以使用本节介绍的方法来加速计算的收敛或者 / 和提高求解过程的稳定性。

能量方程的亚松弛

当用户使用分离式求解器时，FLUENT 使用亚松弛参数（系数，在 **Solution Controls** panel 面板中由用户定义，请参阅 22.9 节）来对能量方程进行亚松弛处理。

Solve → Controls → Solution...

如果使用非绝热、非预混燃烧模型，用户可以设定能量方程的亚松弛系数，也可以对温度进行亚松弛处理，如下所述。

无论能量方程采用那种形式（温度或焓），FLUENT 使用的缺省亚松弛系数都是 1.0。在能量场影响到流场的情况下（通过依赖于温度的变量的改变或者浮力的影响），用户应该使用

较小的亚松弛系数（一般为 0.8～1.0）。对于流场不受温度场影响的情况（没有依赖于温度的变量或者浮力的影响），用户可以保持缺省的亚松弛系数值为 1.0。

求解焓方程时的温度亚松弛

在能量方程以焓的形式表示时（例如，当用户使用非绝热、非预混燃烧模型），FLUENT 对温度急性亚松弛处理，即每次对温度变化只进行部分更新从而对焓值就进行了亚松弛处理。这种间接方式亚松弛使用户可以令焓值迅速改变，而温度（会影响到流体的属性）相对要滞后。FLUENT 中温度亚松弛系数的缺省值为 1.0。用户可以在 **Solution Controls** panel.面板中进行更改。

禁止组分扩散项

如果使用分离式求解器时收敛困难，那么，用户可以考虑在 **Species Model** panel.面板中禁止 **Diffusion Energy Source** 选项。

Define →Models →Species...

当此选项被禁止时，FLUENT 将忽略能量方程中的组分扩散的影响。

需要注意的是，对于任何耦合求解器，总是包含有组分扩散的影响。

逐步求解

对于传热计算，更有效的计算策略是先计算绝热流动，然后再考虑能量方程的计算。依据流动与传热是否耦合，求解过程稍有不同。

非耦合的流动-传热计算

若用户的问题是非耦合的流动-传热过程（没有依赖于温度的介质属性或浮力），那么，用户可以先求解绝热流动（屏蔽掉能量方程）以得到收敛的流场，然后再单独求解能量输运方程。

!! 由于耦合求解器同时求解流动与能量方程，所以，上述的能量方程单独求解过程仅对分离式求解器有效。

用户在 **Solution Controls** panel（请参阅 22.19.2 节）面板中的 **Equations** 列表中不选择 **Energy** 选项，就可以临时性的屏蔽掉能量方程的求解。

Solve →Controls →Solution...

流动与传热的耦合计算

对于流动与传热耦合问题（例如，模型中包含有依赖于温度的介质属性或浮力），在计算能量方程之前，用户可以首先求解流动方程。获得收敛的流场计算结果之后，用户可以再选择能量方程，然后同时求解流动与传热方程，最终获得问题的完整解。

11.2.4 传热变量的输出与显示

对于传热过程，FLUENT 提供另外的几种输出（汇报）选项。用户可以生成如下的图形或输出变量 / 函数：

- 温度
- 总温（滞止温度）
- 焓
- 相对滞止温度
- **Rothalpy**
- 壁面温度（外表面）
- 壁面温度（内表面）
- 滞止焓
- 滞止焓梯度
- 熵
- 总能
- 内能

- 表面总热流密度
- 表面传热系数
- 表面努塞尔数
- 表面斯坦顿数

上述的前 12 个变量列于后处理面板中的 **Temperature...**目录下的下拉列表中，其余的变量列于 **Wall Fluxes...**目录之下。关于这些变量的定义请参阅第 27 章。

输出与显示总的焓与能量的定义

依据流体是否可压缩，焓与能量的输出值的定义有所不同。关于完整的变量定义请参阅 27.4 节。

穿过边界的热流量（热通量）的输出

用户可以使用面板来计算求解域中每个边界的传热量，或者是对所有边界的传热量求和以检查热量的平衡。

Report →Fluxes...

我们推荐用户进行热平衡的检查以确保计算结果达到真实收敛状态。关于生成热流量的输出项目请参阅 26.2 节。

穿过表面的热流通量的输出

用户可以使用 **Surface Integrals** panel 面板（请参阅 26.5 节）来计算穿过任一边界或表面（使用第 24 章所介绍的方法创建而成）的热流通量。

Report →Surface Integrals...

为了要输出焓的流率（通量）：

$$Q=\int H\rho\vec{v}\cdot d\vec{A} \qquad (11.2.13)$$

在 **Surface Integrals** 面板中选定 **Mass Flow Rate** 选项，然后在 **Field Variable** 区选定 **Enthalpy**（在 **Temperature...**目录列表下），然后点取希望进行积分的表面。

平均传热系数的输出

Surface Integrals panel 面板可以用来输出某个面的平均传热系数 h 。

Report →Surface Integrals...

在 **Surface Integrals** 面板中，选定 **Area-Weighted Average** 选项，然后在 **Field Variable** 区选定 **Surface Heat Transfer Coef.**（在 **Temperature...**目录列表下），点取某个表面即可。

11.2.5 热流数据的输出

用户可以把壁面区域（包括辐射体）的热流数据输出到文件中，然后就可以进行计算数据的检查或在在其它程序中使用。为了存贮热流数据文件，用户可以使用 custom-heat-flux 命令行。

file →export →custom-heat-flux

用户选定的区域（面区域，face zone）热流数据文件的输出格式为：

```
zone-name nfaces
x_f  y_f  z_f  A  Q  T_w  T_c
.
.
```

每个数据区以区域名称（zone-name）开始，然后是在此区域包含的面的总数（nfaces）。接下来是每一个面的相关数据（共有 nfaces 行），每行数据包含面的几何中心坐标（x_f, y_f, and, 三维时还包含, z_f）、面的面积（A)）、包扩辐射传热的总热流量（Q）、面的温度（T_w）以及相邻单元的温度（T_c）。

11.3 辐射传热

对辐射模型的介绍组织如下：

11.3.1 辐射传热简介
11.3.2 选择辐射模型
11.3.3 离散传播辐射模型
11.3.4 **P-1** 辐射模型
11.3.5 **Rosseland** 辐射模型
11.3.6 离散坐标辐射模型
11.3.7 表面辐射模型
11.3.8 燃烧过程的辐射
11.3.9 辐射模型使用概览
11.3.10 辐射模型的选择
11.3.11 离散传播模型的跟踪射线的定义
11.3.12 表面辐射模型中角系数的计算与数据读取
11.3.13 Defining the Angular Discretization for the DO Model
11.3.14 离散坐标辐射模型中的非灰体辐射
11.3.15 有关辐射性能的材料属性定义
11.3.16 辐射边界条件设定
11.3.17 辐射计算参数的设定
11.3.18 问题求解过程
11.3.19 Reporting and Displaying Radiation Quantities 辐射
11.3.20 Displaying Rays and Clusters for the DTRM

11.3.1 辐射传热简介

FLUENT 提供五种辐射模型，用户可以在其传热计算中使用这些模型（可以包括 / 不包括辐射性介质）：

- 离散传播辐射（DTRM）模型[30, 208]
- P-1 辐射模型[35, 210]
- Rosseland 辐射模型[210]
- 表面辐射（S2S）模型[210]
- 离散坐标辐射（DO）模型[37, 183]

是用上述的辐射模型，用户就可以在其计算中考虑壁面由于辐射而引起的加热 / 冷却以及流体相的由辐射引起的热量源 / 汇。

辐射传热方程

对于具有吸收、发射、散射性质的介质，在位置 $\vec{r}$ 、沿方向 $\vec{s}$ 的辐射传播方程（RTE）为：

$$\frac{dI(\vec{r},\vec{s})}{ds}+\left(a+\sigma_s\right)I\left(\vec{r},\vec{s}\right)=an^2\frac{\sigma T^4}{\pi}+\frac{\sigma_s}{4\pi}\int_0^{4\pi}I\left(\vec{r},\vec{s}'\right)\Phi\left(\vec{s},\vec{s}'\right)d\Omega' \qquad (11.3.1)$$

其中：

$\vec{r}$ 位置向量

$\vec{s}$ 方向向量

$\vec{s}'$ 散射方向

s 沿程长度（行程长度）

a 吸收系数

n 折射系数

σ_s 散射系数

σ 斯蒂芬－玻耳兹曼常数（$5.672\times10^{-8}W/m^2-K^4$）

I 辐射强度，依赖于位置（$\vec{r}$）与方向（$\vec{r}$）

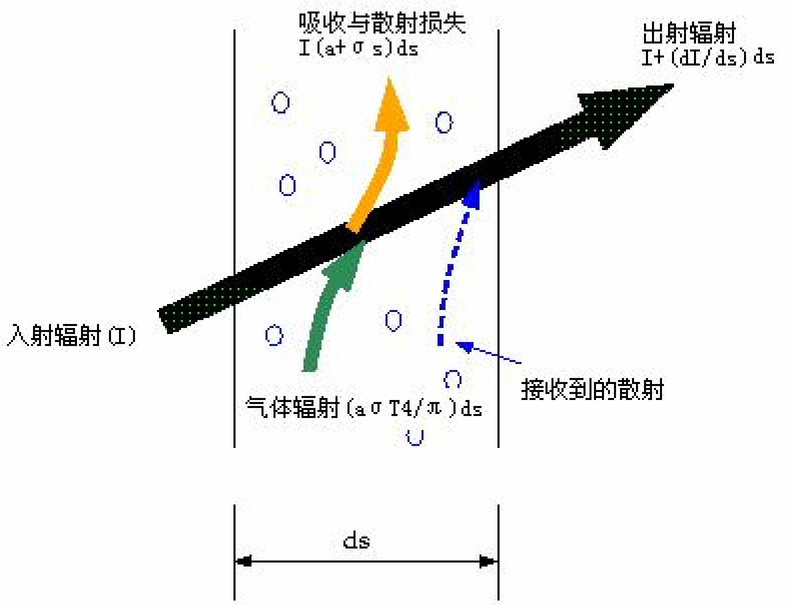
T 当地温度

Φ 相位函数

Ω' 空间立体角

$\left(a+\sigma_s\right)s$ 为介质的光学深度（光学模糊度）。对于半透明介质的辐射，折射系数很重要。

图 11.3.1 为辐射传热过程的示意图。



图表 3 辐射传播方程

DTRM、P-1、Rosseland 以及 DO 辐射模型需要把吸收系数作为输入项。a 和散射系数 σ_s 可以是常数；a 也可以是当地 H_2O 和 CO_2、行程长度以及总压的函数。FLUENT 提供灰气体加权平均模型（WSGGM）来计算变化的吸收系数。细节请参阅 11.3.8。离散坐标模型可以模拟半透明介质内的辐射传递过程，对于这类问题，必须给出介质的折射系数 n 。

辐射传播方程的应用范围

辐射传播方程能够应用的典型场合包括：

- 火焰辐射
- 表面辐射换热
- 导热、对流与辐射的耦合问题
- HVAC（Heating Ventilating and Air Conditioning，采暖、通风和空调工业）中通过开口的辐射换热以及汽车工业中车厢的传热分析
- 玻璃加工、玻璃纤维拉拔过程以及陶瓷工业中的辐射传热

在辐射换热量（$Q_{rad} = \sigma\left(T_{\max}^4 - T_{\min}^4\right)$）与导热、对流换热量相比较大时，用户应该考虑在其计算中包含由辐射传热过程。在高温情况下，由于辐射换热量与温度四次方成比例，这时，辐射传热将占据传热的主导地位。

11.3.2 选择辐射模型

对于某些问题，某个辐射模型可能比其它模型更适用。在确定使用何种辐射模型时，需要考虑的因素如下：

- 光学深度：光学深度 αL 是确定选择辐射模型较好的指标。其中，L 为计算域大致的长度标尺。例如，对于燃烧室内的流动，L 为燃烧室的直径。如果 $\alpha L \gg 1$，那么，最好的选择是使用 P-1 或 Rosseland 辐射模型。P-1 模型一般都用于光学深度>1 的情况。若光学深度>3，Rosseland 模型计算量更小而且更加有效。DTRM 和 DO 对于任何的光学深度都适用，但是，它们计算量也更大。因此，如果问题允许的话，应尽可能的选择具有“光学深度限制”的 P-1 或 Rosseland 辐射模型。对于光学深度较小的问题，只有 DTRM 和 DO 模型时适用的。
- 散射与发射：P-1, Rosseland 和 DO 模型考虑散射的影响，而 DTRM 忽略此项。由于 Rosseland 模型在壁面使用具有温度滑移的边界条件，所以，它对壁面的发射率（黑度）不敏感。
- 只有 P-1 和 DO 模型考虑气体与颗粒之间的辐射换热（请参阅方程 11.3-15）。
- 半透明介质与镜面边界：只有 DO 模型允许出现镜面反射（全反射，例如镜子）以及在半透明介质（例如玻璃）内的辐射。
- 非灰体辐射：只有 DO 模型能够允许用户使用灰带模型计算非灰体辐射。
- 局部热源：对于具有局部热源的问题，P-1 模型可能会过高估计辐射热流。这种情况下，DO 模型可能会是最好的辐射计算方法，当然，如果具有足够多的射线数目，DTRM 模型的计算结果也可以接受。
- 没有辐射介质情况下的封闭腔体内的辐射传热：表面辐射换热模型（S2S）适用于这种情况。从原理上讲，使用具有辐射介质的各种辐射模型也可以计算辐射表面间的换热，但计算结果并非总是很好。

来自计算区域外的辐射

如果用户希望考虑计算区域之外的辐射的影响,那么,可在其模型中使用外部辐射边界条件（请参阅 6.13.1 节）。如果用户并不关心计算域内的辐射过程，那么，使用这种边界条件就不需要使用任何辐射模型。

DTRM 辐射模型的优缺点

11.3.3 离散传播辐射模型（DTRM）

DTRM 辐射模型的主要假设是用单一的（辐射）射线代替从辐射表面沿某个立体角的所有辐射效应。这一节详细介绍 DTRM 模型中所使用的方程。

DTRM 方程

辐射强度（辐射密度）的变化，dI，沿其行程 ds 的微分方程为：

$$\frac{dI}{ds}+aI=\frac{a\sigma T^4}{\pi} \qquad (11.3.2)$$

其中：a ＝气体辐射吸收（发射，黑度）系数

I ＝辐射强度

T ＝当地气体温度

σ 斯蒂芬－玻耳兹曼常数（$5.672\times10^{-8}W/m^2-K^4$）

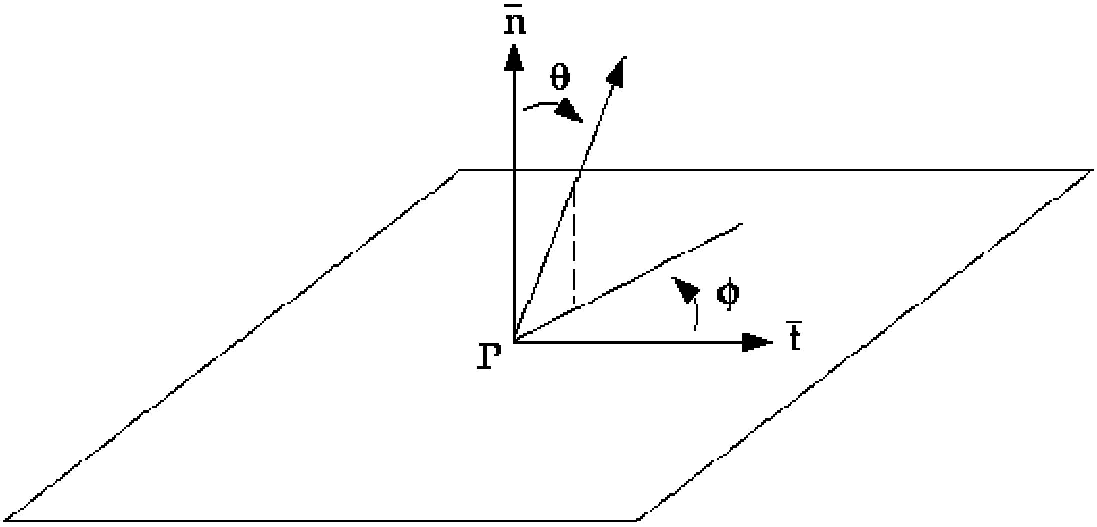
方程中，假设气体的折射系数为 1。在 DTRM 模型中，对方程 11.3.2 从边界面出发，沿辐射行程积分。若沿着射线行程，a 为常数，那么，对于 $I(s)$，有：

$$I(s)=\frac{\sigma T^4}{\pi}\left(1-e^{-as}\right)+I_0e^{-as} \qquad (11.3.3)$$

其中，为射线行程起始点的辐射强度，它由相应的边界条件确定（关于辐射边界条件，请参阅下面的介绍）。跟踪穿过流体计算单元中的每条射线，求得他们的辐射强度变化之后，对所有的辐射变化求和，就得到对应于每个流体单元内能量方程的热量源项（由辐射引起的）。DTRM 模型使用的“射线跟踪”方法可用来计算各个表面之间的辐射传热，而却不需要去计算（表面的）角系数。此模型的计算精度主要由所跟踪射线的数目以及计算网格密度决定。

射线跟踪

射线行程的计算与存储先于流体流动的计算。在每个辐射面，射线按照一定的经度角和纬度角进行离散处理（图 11.3.2）。为了覆盖辐射半球空间，θ（纬度角）从 0 变化到 $\frac{\pi}{2}$；ϕ（经度角）从 0 变化到 π。然后，跟踪每条射线以确定与射线相交的计算单元和射线穿越单元的距离。这些信息存储在一个辐射文件中，在开始流体计算之前，必须首先把这个文件读进来。



图表 4 P 点在半球空间沿一定经/纬度角的空间立体角的定义

射线（辐射面）束

当跟踪多个表面，并且射线穿越很多计算单元时，DTRM 的计算量非常大。为了减少计算量，辐射表面和吸收辐射的计算单元被分成射线束和辐射吸收体。辐射吸收体的组成由某个计算单元开始，加上此单元的临近单元，直到总单元数目达到设定的每个辐射吸收体所包含的单元总数。同理，射线束的组成由某个面（单元）开始，加上此面单元的临近面，直到面单元数目达到每个设定的射线束所包含的面单元总数。

对于每个射线束与辐射吸收体，分别计算其入射辐射通量，q_{in} 与（能量方程中的）体积源相。这些量值被分配到射线束与辐射吸收体所包含内的每个单元，据此来计算壁面与（计算控制）单元的温度。由于辐射源相的高度非线性（），用户必须仔细计算表面束与吸收体的温度以及辐射通量和源相在组成这些束（体）的各个单元之间的分配。

表面束与吸收体的温度是通过对面积的加权平均得到的：

$$T_{sc} = \left(\frac{\sum_f A_f T_f^4}{\sum A_f} \right)^{1/4} \qquad (11.3.4)$$

$$T_{vc} = \left(\frac{\sum_c A_c T_c^4}{\sum A_c} \right)^{1/4} \qquad (11.3.5)$$

其中，T_{sc}, T_{vc} 分别为表面束与吸收体的温度；A_f, T_f 分别为某个表面（单元）f 的面积与温度；A_c, T_c 分别为某个计算单元 c 的面积与温度。求和是对射线束和吸收体内的所有单元进行的。

DTRM 辐射模型中壁面边界条件的处理

对紧靠壁面一点的辐射强度积分就得到入射辐射热流 q_{in}：

$$q_{in} = \int_{\vec{s}\bullet\vec{n}>0} I_{in} \vec{s} \bullet \vec{n} d\Omega \qquad (11.3.6)$$

其中，Ω 为半球立体角，I_{in} 为入射射线的辐射强度，$\vec{s}$ 为射线方向，$\vec{n}$ 为表面的法线方向（指向外）。表面的净（出射）辐射热流 q_{out} 就等于入射辐射加上对入射辐射 q_{in} 的反射和表面的自身辐射：

$$q_{out} = (1-\varepsilon_w)q_{in} + \varepsilon_w \sigma T_w^4 \qquad (11.3.7)$$

其中，为表面 P 点的壁面温度，为由用户作为边界条件设定的壁面发射率（黑度）。方城 11.3.7 也同时给出了从 P 点发出的辐射射线的辐射强度 I_0 的边界条件：

$$I_0 = \frac{q_{out}}{\pi} \qquad (11.3.8)$$

DTRM 模型在流动入口与出口的边界条件处理

在流动入口与出口，净辐射热流的计算方法与上述的方法相同。除非用户更改设定，FLUENT 假定在入（出）口的黑度均为 1.0（绝对黑体）。

FLUENT 中，对于流动的入（出）口，用户可以对辐射与对流设定不同的温度值。在入（出）口的外部区域的温度与内部区域的温度相差很大时，这种处理方法非常有用。细节请参阅 11.3.16 节。

11.3.4 P-1 辐射模型

P-1 辐射模型是 P-N 模型中最简单的类型。P-N 模型的出发点是把辐射强度展开成为正交的球谐函数（正交序列级数，[35, 210]）。本节详细介绍 P-1 辐射模型所使用的各个方程。

P-1 辐射模型方程

正如上文所说，P-1 辐射模型是 P-N 模型中最简单的类型。如果只取正交球谐函数的前四项，对于辐射热流 q_r，我们能得到如下的方程：

$$q_r = -\frac{1}{3(a+\sigma_s) - C\sigma_s}\nabla G \qquad (11.3.9)$$

其中，a 为吸收系数，σ_s 为散射系数，G 为入射辐射，C 为线性各相异性相位函数系数（linear-anisotropic phase function，请参阅下面的介绍），引入参数：

$$\Gamma = \frac{1}{(3(a+\sigma_s) - C\sigma_s)} \qquad (11.3.10)$$

之后，方程 11.3.9 可化为：

$$q_r = -\Gamma \nabla G \qquad (11.3.11)$$

G 的输运方程为：

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = S_G \qquad (11.3.12)$$

其中，σ 为斯蒂芬－玻尔兹曼常数，S_G 为用户定义的辐射源相。使用 P－1 模型时，FLUENT 求解这个方程以得到当地辐射强度。
合并方程 11.3-11 和 11.3-12，可得到如下方程：

$$-\nabla q_r = aG - 4a\sigma T^4 \qquad (11.3.13)$$

$-\nabla q_r$ 的表达式可以直接带入能量方程，从而得到由于辐射所引起的热量源（汇）。

各相异性散射

P－1 模型可以模拟各相异性散射问题。FLUENT 使用一个线性各相异性散射相位函数来模拟这种各相异性散射问题：

$$\Phi\left(\vec{s}' \bullet \vec{s}\right) = 1 + C\vec{s}' \bullet \vec{s} \qquad (11.3.14)$$

其中，$\vec{s}$ 为散射方向的单位向量；$\vec{s}'$ 为入射辐射方向的单位向量，C 为线性各相异性散射相位函数常数，此常数为流体的物性参数。C 的取值范围是-1.0～1.0。若 C 为正值，则表明向前的散射辐射量大于向后的散射辐射量；若为负值，则表明向后的散射辐射量大于向前的散射辐射量；若为零（FLUENT 的缺省值），表明散射为各向同性（即散射量在所有的方向均相同）。只有在介质具有明显的各相异性属性时，用户才需要修改此缺省值。

P-1 模型中颗粒的影响

当模型中包含有颗粒分散相时，用户可以在 P-1 辐射模型中考虑颗粒的影响。一旦考虑颗粒辐射时，FLUENT 将忽略气相的散射（即在方程 11.3-15 中，假定所有的散射全部由颗粒引起）。
对于包含有吸收、发射、散射性质颗粒的具有吸收、发射、散射的灰体介质，入射辐射的输运方程为:

$$\nabla \bullet (\Gamma \nabla G) + 4\pi\left(a\frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p\right) - (a + a_p)G = 0 \qquad (11.3.15)$$

其中，E_p 为颗粒的等效辐射，a_p 为颗粒的等效吸收系数。它们的定义如下：

$$E_p = \lim_{V\to 0}\sum_{n=1}^{N}\varepsilon_{pn}A_{pn}\frac{\sigma T_{pn}^4}{\pi V} \qquad (11.3.16)$$

$$a_p = \lim_{V\to 0}\sum_{n=1}^{N}\varepsilon_{pn}\frac{A_{pn}}{V} \qquad (11.3.17)$$

方程 11.3.16、11.3.17 中，$\varepsilon_{pn}, A_{pn}, T_{pn}$ 分别为第 n 个颗粒的黑度、投影面积（垂直辐射方向）和温度。求和是对控制体 V 内的所有 N 个颗粒进行的。FLUENT 中在进行颗粒的跟踪计算时，这些量一并进行计算。

第 n 个颗粒的投影面积 A_{pn} 的定义为：

$$A_{pn} = \frac{\pi d_{pn}^2}{4} \qquad (11.3.18)$$

其中，d_{pn} 为第 n 个颗粒的直径。

方程 11.3-15 中 Γ 的定义为：

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + a_p + \sigma_p)} \qquad (11.3.19)$$

其中，等效颗粒散射因子定义为：

$$\sigma_p = \lim_{V\to 0}\sum_{n=1}^{N}(1 - f_{pn})(1 - \varepsilon_{pn})\frac{A_{pn}}{V} \qquad (11.3.20)$$

它是在颗粒跟踪计算过程中得到的。方程 11.3-20 中的 f_{pn} 为第 n 个颗粒的散射系数。

能量方程中，由于颗粒辐射引起的热量源项的表达式为：

$$-\nabla q_r = -4\pi\left(a\frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p\right) + (a + a_p)G \qquad (11.3.21)$$

P-1 模型的壁面边界条件处理

为了得到入射辐射方程的边界条件，用（边界）法线向量 $\vec{n}$ 点乘方程 11.3-11 得：

$$q_r \bullet \vec{n} = -\Gamma\nabla G \bullet \vec{n} \qquad (11.3.22)$$

$$q_{r,w} = -\Gamma\frac{\partial G}{\partial n} \qquad (11.3.23)$$

这样，入射辐射热流 G 在壁面为 $-q_{r,w}$。壁面的辐射热流使用下面的边界条件计算得到：

$$I_w(\vec{r},\vec{s}) = f_w(\vec{r},\vec{s}) \qquad (11.3.24)$$

$$f_w(\vec{r},\vec{s}) = \varepsilon_w\frac{\sigma T_w^4}{\pi} + \rho_w I(\vec{r},-\vec{s}) \qquad (11.3.25)$$

其中，ρ_w 为壁面发射率。然后应用 Marshak 边界条件来消除辐射角度的影响[171]：

$$\int_0^{2\pi} I_w(\vec{r},\vec{s})\vec{n} \bullet \vec{s}\,d\Omega = \int_0^{2\pi} f_w(\vec{r},\vec{s})\vec{n} \bullet \vec{s}\,d\Omega \qquad (11.3.26)$$

把方程 11.3-24 和 11.3-25 代入方程 11.3-26，然后积分得：

$$q_{r,w} = -\frac{4\pi\varepsilon_w\frac{\sigma T_w^4}{\pi} - (1 - \rho_w)G_w}{2(1 + \rho_w)} \qquad (11.3.27)$$

若假定壁面为漫灰表面，那么，$\rho_w = 1 - \varepsilon_w$，方程 11.3-27 变为：

$$q_{r,w} = -\frac{\varepsilon_w}{2(2 - \varepsilon_w)}\left(4\sigma T_w^4 - G_w\right) \qquad (11.3.28)$$

方程 11.3-28 用来计算能量方程中的 $q_{r,w}$ 以及辐射方程的边界条件。

P-1 辐射模型的流动入（出）口处边界条件的处理

流动入（出）口的净辐射热流的计算与上述的方法相同。除非用户更改设定，FLUENT 假定在入（出）口的黑度均为 1.0（绝对黑体）。

FLUENT 中，对于流动的入（出）口，用户可以对辐射与对流设定不同的温度值。在入（出）口的外部区域的温度与内部区域的温度相差很大时，这种处理方法非常有用。细节请参阅 11.3.16 节。

11.3.5 Rosseland 辐射模型

在介质的光学深度很大时（$(a+\sigma_s)L >> 1$），辐射的 Rosseland 或漫射近似是种有效地处理方法。我们推荐在光学深度大于 3 时，可以使用 Rosseland 辐射模型。这个模型可以从 P-1 辐射模型按照某些假设推导而来。本节详细介绍 Rosseland 辐射模型所使用的方程。

Rosseland 模型方程

正如 P-1 辐射模型，在灰（体）介质内的辐射热流向量可由方程 11.3-11 近似：

$$q_r = -\Gamma \nabla G \qquad (11.3.29)$$

其中，Γ 由方程 11.3-10 确定。

与模型不同的是，Rosseland 模型假定辐射强度 G 等于当地温度下的黑体辐射（P-1 模型计算 G 的输运方程）。因此，$G = 4\sigma T^4$。把 G 的表达式带入方程 11.3-29，有：

$$q_r = -16\sigma\Gamma T^3 \nabla T \qquad (11.3.30)$$

由于辐射热流的表达式类似于傅立叶热传导定律，因此有：

$$q = q_c + q_r \qquad (11.3.31)$$

$$= -(k + k_r)\nabla T \qquad (11.3.32)$$

$$k_r = 16\sigma\Gamma T^3 \qquad (11.3.33)$$

其中，k 为导热率，k_r 为“辐射导热率”。能量方程中使用方程 11.3-31 来计算温度场。

各向异性辐射

使用上述的 P-1 模型中的相位函数（方程 11.3-14，11.3.4 节），Rosseland 辐射模型可以计算各向异性辐射。

Rosseland 辐射模型在壁面处的边界条件处理

因为辐射的漫射假设在壁面处并非有效，所以必须在壁面使用温度滑移的边界条件。壁面处的辐射热流 q_r 使用滑移系数 ψ 来进行定义：

$$q_{r,w} = -\frac{\sigma\left(T_w^4 - T_g^4\right)}{\psi} \qquad (11.3.34)$$

其中，T_w 为壁面温度，T_g 为在壁面附近的气相温度，（温度）滑移系数 ψ 是对[210]给出的数据进行曲线拟合得到：

$$\psi = 1/2 \qquad N_w < 0.01$$

$$\psi = \frac{2x^3 + 3x^2 - 12x + 7}{54} \qquad 0.01 \le N_w \le 10 \qquad (11.3.35)$$

$$\psi = 0 \qquad N_w > 10$$

其中，N_w 为壁面处的一个辐射参数：

$$N_w = \frac{k(a + \sigma_s)}{4\sigma T_w^3} \qquad (11.3.36)$$

以及 $x = \log_{10} N_w$。

Rosseland 辐射模型的流动入（出）口处边界条件的处理

对于辐射模型，在流动的入（出）口不需要特别的处理。在此类边界处，辐射热流可由方程 11.3-31 所确定。

FLUENT 中，对于流动的入（出）口，用户可以对辐射与对流设定不同的温度值。在入（出）口的外部区域的温度与内部区域的温度相差很大时，这种处理方法非常有用。细节请参阅 11.3.16 节。

11.3.6 DO 辐射模型

离散坐标模型求解的是从有限个立体角发出的辐射传播方程（RTE)，每个立体角对应着坐标系（笛卡儿）下的固定方向 $\vec{s}$。立体角的离散精度由用户确定，他有点类似于 DTRM 模型中的射线数目。但与其不同的是，DO 模型并不进行射线跟踪，相反，DO 模型把方程 11.3-1 转化为空间坐标系下的辐射强度的输运方程。有多少个（立体角）方向 $\vec{s}$，就求解多少（辐射强度）输运方程。方程的求解方法与流体流动以及能量方程的求解方法相同。

FLUENT 中，离散坐标模型使用一种被称作有限容积法的守恒差分格式（[37, 183],)，此差分方法继而北扩展到非结构化网格上（[165].)。

DO 模型方程

DO 模型把沿 $\vec{s}$ 方向传播的辐射方程（RTE）视为某个场方程。这样，方程 11.3-1 化为：

$$\nabla \bullet \left(I(\vec{r},\vec{s})\vec{s}\right) + (a + \sigma_s) I(\vec{r},\vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_0^{4\pi} I(\vec{r},\vec{s})\Phi(\vec{s},\vec{s}')d\Omega' \qquad (11.3.37)$$

FLUENT 允许用户使用灰带模型来模拟非灰体辐射。对于光谱辐射强度，$I_\lambda(\vec{r},\vec{s})$ 其辐射传播方程为 ：

$$\nabla \bullet \left(I_\lambda \left(\vec{r}, \vec{s}\right) \vec{s} \right) + \left(a_\lambda + \sigma_s \right) I_\lambda \left(\vec{r}, \vec{s}\right) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda \left(\vec{r}, \vec{s}\right) \Phi \left(\vec{s}, \vec{s}'\right) d\Omega' \qquad (11.3.38)$$

其中，λ 为辐射波长，a_λ 为光谱吸收系数，$I_{b\lambda}$ 为由 PLANCK 定律确定的黑体辐射强度。散射系数、散射相位函数、以及折射系数均假定与波长无关。

非灰体的 DO 辐射模型把整个辐射光谱带分成 N 个波（长）带，这些波带并不需要是连续或等间距的。波长间隔由用户给定，此间隔为真空时的取值（折射指数 $n=1$）。RTE 方程在所有的波长范围内对波长进行积分，这样就得到关于 $I_\lambda \Delta\lambda$ 的输运方程。辐射热量包含在每一个波带 $\Delta\lambda$ 内。在每个波带之内，认为是黑体辐射，其单位立体角的黑体辐射（力）为：

$$\left[F\left(0 \to n\lambda_2 T\right) - F\left(0 \to n\lambda_1 T\right) \right] n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \qquad (11.3.39)$$

其中，$F\left(0 \to n\lambda T\right)$ 为折射率为 n 的介质，在温度 T 下，$0 \sim \lambda$ 波长范围内黑体的辐射（力）[161]。λ_1, λ_2 是波带的边界。

在方向 $\vec{s}$，位置 $\vec{r}$ 处的总辐射强度 $I\left(\vec{r}, \vec{s}\right)$ 为：

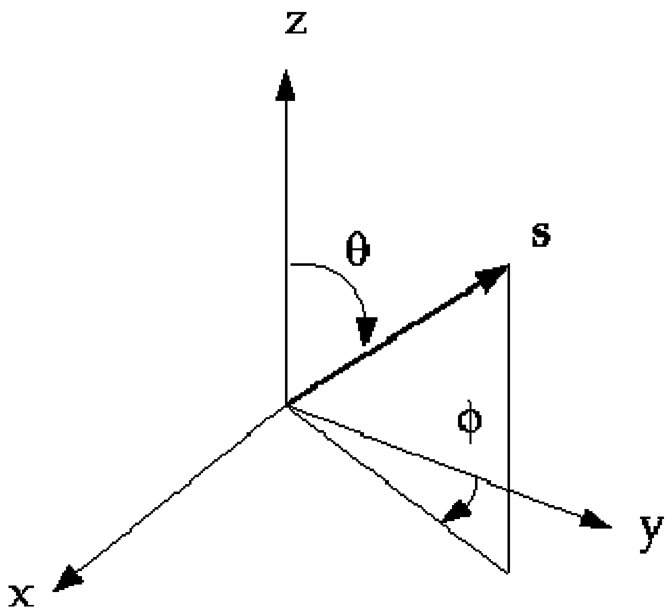
$$I\left(\vec{r}, \vec{s}\right) = \sum_k I_{\lambda k} \left(\vec{r}, \vec{s}\right) \Delta\lambda_k \qquad (11.3.40)$$

其中，求和是在整个波长范围内进行。

对于非灰体的 DO 模型的边界条件是基于波带的边界条件（即每个波带都对应一个边界条件）。在一个波带之内，其边界条件的处理与灰体的 DO 模型相同。

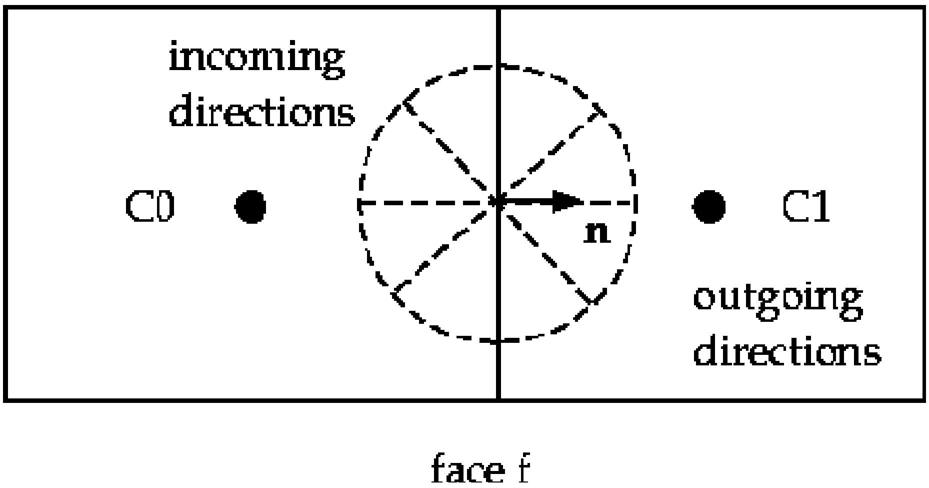
角度的离散和象点处理

空间中某一位置的 4π 空间角的每个象限被分割成 $N_\theta \times N_\phi$ 个被称为控制角的辐射立体角 ϖ_i。θ, ϕ 分别为经 / 纬度角，其参考坐标系为全局固定的笛卡尔坐标系（x, y, z，请参见图 11.3.3）。控制角 θ, ϕ 的大小 $\Delta\theta$，$\Delta\phi$ 是常数。在 2D 情况下，又有对成，仅求解四个象限，这样，总共就只有 $4N_\theta N_\phi$ 个求解方向；对于 3D 情况，总共为 $8N_\theta N_\phi$ 个方向。对于非灰体模型，在每个波带分别有 $4N_\theta N_\phi$ 或 $8N_\theta N_\phi$ 个需要求解的方程。

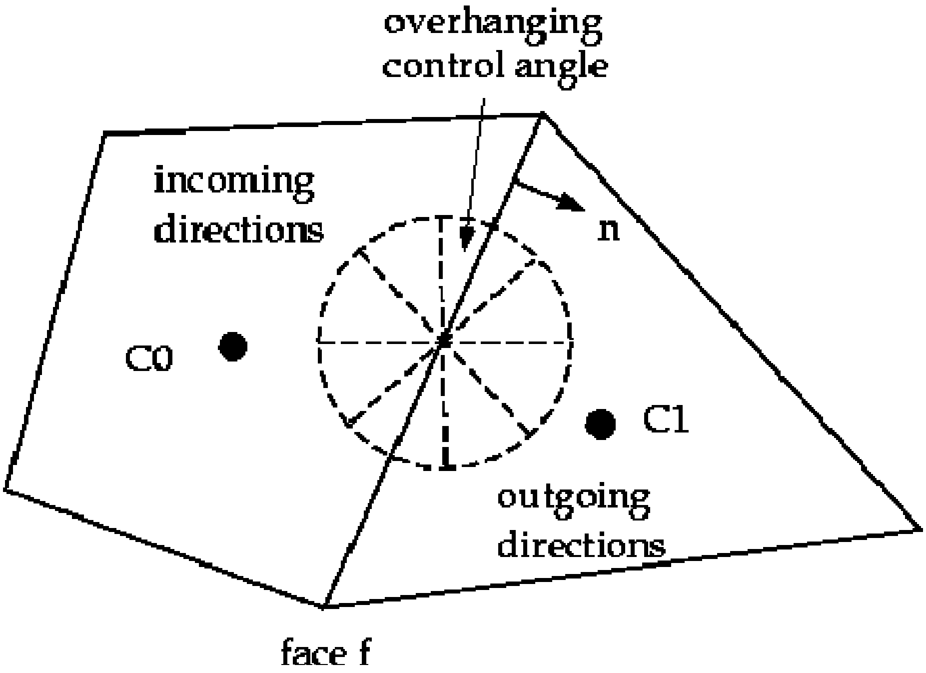


图表 5 离散角的参考坐标系

使用直角坐标网格（）时，可以把全局角度离散方向与控制体（单元）面的方向对齐，如图 11.3.4 所示。但对于一般的非结构化网格来说，控制体面与角度离散方向不会完全对齐，如图 11.3.5 所示，这样，就产生了（辐射离散）控制角（与网格面）的交错（control angle overhang）问题[165].。

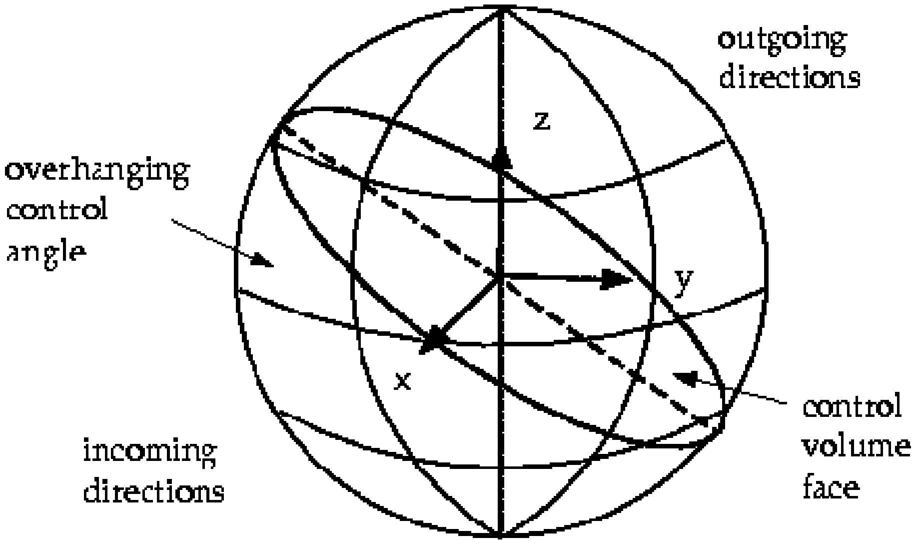


图表 6 不存在控制角交错的网格面



图表 7 存在控制角交错的网格面

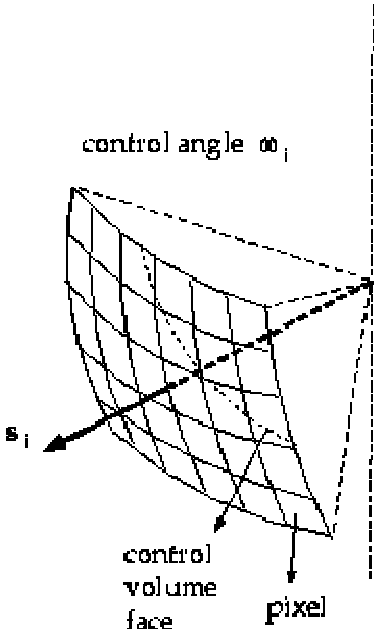
一般说来，控制角可能会跨越控制体单元面，这样，辐射就部分进入这个网格面而一部分离开此网格面。图 11.3.6 为一个 3D 问题中控制角跨越控制体面的例子。



图表 8 控制角与单元面交错例子（3D）

控制体面可以以任何角度切割代表离散空间角的球形空间。割线为一大圆。交错的控制角既可作为发射面也可能发生折射。此种情况下，正确的考虑交错的比例很重要。这种考虑是通过应用像点（pixelation ）来实现的[165].。

每个交错的控制角被分成 $N_{\theta_p} \times N_{\phi_p}$ 个像点，如图 11.3.7 所示。



图表 9 交错控制角的像点

在每个像点说包含的能量被视为入射和出射两部分。这样，交错比例的影响可以通过像点来考虑。FLUENT 允许用户选择像点划分方法。对于漫灰辐射，缺省的像点设置1×1是足够精确的；对于涉及到对称、周期性对称、镜面边界或半透明边界的情况，推荐使用3×3的像点设置。但用户应该知道，增加像点的数目将加大计算量。

各向异性散射

FLUENT 中的 DO 模型允许散射相函数为变量。用户可以使用各向同性的相函数、线性各向异性相函数、Delta-Eddington 相函数或者是用户定义响函数。线性各向异性相函数由方程 11.3-14 定义。Delta-Eddington 相函数采用如下的形式：

$$\Phi(\vec{s}\bullet\vec{s}')=2f\delta(\vec{s}\bullet\vec{s}')+(1+f)(1+C\vec{s}\bullet\vec{s}') \qquad (11.3.41)$$

其中，f 为向前辐射因子，$\delta(\vec{s},\vec{s}')$为狄拉克 delta 函数。f 项确定了散射分量的大小，这样，若 $f=1$，Delta-Eddington 相函数表示不发生散射。C 为反对称因子。当使用 Delta-Eddington 相函数时，用户应设定 f 和数值。

若使用用户定义函数来设定散射相函数，FLUENT 假设相函数采用如下的表达式：

$$\Phi(\vec{s},\vec{s}')=2f\delta(\vec{s},\vec{s}')+(1-f)\Phi^*(\vec{s},\vec{s}') \qquad (11.3.42)$$

用户定义函数将设定$\Phi*$和向前散射因子 f 。

适用于辉锑辐射的散射相函数也适用于非灰体辐射。但是，说对应的散射能量为单个波带内的能量。

DO 模型中颗粒的影响

DO 模型允许用户在辐射过程中包含有离散的第二相颗粒的影响。此种情况下，FLUENT 将忽略所有的气相散射。

在辐射传递方程中，颗粒相的影响表示为：

$$\nabla \bullet (I\vec{s}) + (a + a_p + \sigma_p) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p + \frac{\sigma_p}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (11.3.43)$$

其中，a_p 为包括颗粒影响的等效吸收系数，其数值有方程 11.3-17 确定。等效发射率 E_p 有方程 11.3-16 确定。等效颗粒散射系数 σ_p 有方程 11.3-20 所定义。

对于非灰体辐射，由于颗粒存在而发生变化的辐射的吸收、发射、散射被包含于辐射计算中的每个波带中，颗粒的发射和吸收项也包含于能量方程中。

漫灰壁面的边界条件处理

对于灰体辐射，壁面的入射辐射热流 q_{in} 为：

$$q_{in} = \int_{\vec{s} \bullet \vec{n} > 0} I_{in} \vec{s} \bullet \vec{n} d\Omega \quad (11.3.44)$$

离开壁面的净辐射热流为：

$$q_{out} = (1 - \varepsilon_w) q_{in} + n^2 \varepsilon_w \sigma T_w^4 \quad (11.3.45)$$

其中，n 为紧靠壁面介质的折射率。对于所有离开壁面的方向 $\vec{s}$，壁面的辐射强度为：

$$I_0 = \frac{q_{out}}{\pi} \quad (11.3.46)$$

对于非灰体辐射，壁面处在波带 $\Delta\lambda$ 内的入射辐射热流 $q_{in,\lambda}$ 为：

$$q_{in,\lambda} = \Delta\lambda \int_{\vec{s} \bullet \vec{n} > 0} I_{in,\lambda} \vec{s} \bullet \vec{n} d\Omega \quad (11.3.47)$$

波带 $\Delta\lambda$ 之内离开壁面的净辐射热流为：

$$q_{out} = (1 - \varepsilon_{w\lambda}) q_{in,\lambda} + \varepsilon_{w\lambda} \left[F(0 \to n\lambda_2 T_w) - F(0 \to n\lambda_1 T_w) \right] n^2 \sigma T_w^4 \quad (11.3.48)$$

其中，$\varepsilon_{w\lambda}$ 为单个波带内的壁面发射率。对于所有离开壁面的方向 $\vec{s}$，在波带 $\Delta\lambda$ 之内壁面的辐射强度为：

$$I_{0\lambda} = \frac{q_{out,\lambda}}{\pi \Delta\lambda} \quad (11.3.49)$$

半透明壁面的边界条件处理

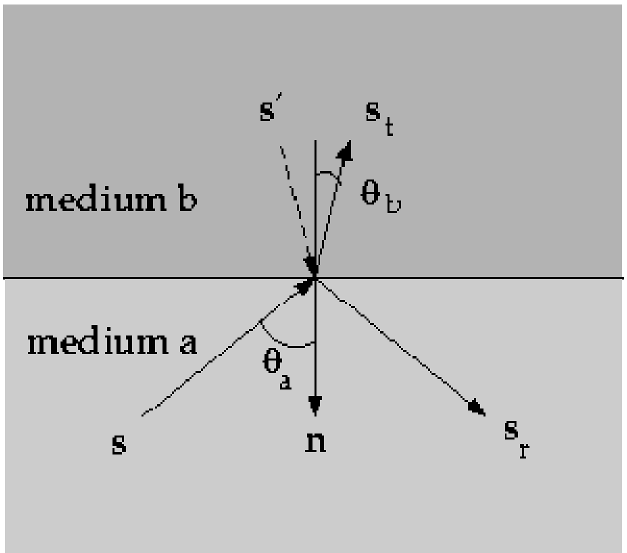
FLUENT 允许用户设定镜面反射或漫反射的半透明壁面。用户可以对壁面的入射辐射设定漫反射和穿透的比例，其余的部分被视为镜面反射。

对于非灰体辐射，这种设定是基于波带的额。在单个波带内，穿透、反射和折射的比例与上述的灰体设置相同。从一个波带到另一个波带不发生辐射的穿透、反射和折射。

镜面反射的半透明壁面

假设有一射线以方向 $\vec{s}$ 从一半透明介质 a（折射率为 n_a）传播到另一半透明介质 b（折射率为 n_b）中，如图 11.3.8 所示。两种介质界面的 a 侧为介质 a，b 侧为介质 b。界面方向 $\vec{n}$

假定指向 a 侧。界面 a 侧的沿方向 $\vec{s}$ 的辐射强度为 $I_a(\vec{s})$，相应的界面 b 侧的辐射强度为 $I_b(\vec{s})$。



$n_b > n_a$

图表 10 两种半透明介质界面的辐射折射与反射

入射辐射的一部分被反射，其余的则穿越界面。由于反射为镜面反射，所以，反射的辐射方向为：

$$\vec{s}_r = \vec{s} - 2(\vec{s} \bullet \vec{n})\vec{n} \qquad (11.3.50)$$

从介质 a 穿越到介质 b 的辐射就是辐射的折射部分。折射后的辐射方向由 Snell 定律确定：

$$\sin\theta_b = \frac{n_a}{n_b}\sin\theta_a \qquad (11.3.51)$$

其中，θ_a 为入射辐射角，θ_b 为折射角，如图 11.3.8 所示。也可以定义方向：

$$\vec{s}' = \vec{s}_t - 2(\vec{s}_t \bullet \vec{n})\vec{n} \qquad (11.3.52)$$

如图 11.3.8 所示。
界面 a 侧的反射率为[161]：

$$r_a(\vec{s}) = \frac{1}{2}\left(\frac{n_a\cos\theta_b - n_b\cos\theta_a}{n_a\cos\theta_b + n_b\cos\theta_a}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{n_a\cos\theta_a - n_b\cos\theta_b}{n_a\cos\theta_a + n_b\cos\theta_b}\right)^2 \qquad (11.3.53)$$

此式表示入射辐射能量从方向 $\vec{s}$ 转移到方向 $\vec{s}_r$ 的比例。

界面 a 侧沿方向 $\vec{s}_r$ 的边界辐射强度 $I_{w,a}(\vec{s}_r)$ 由同侧的入射辐射的反射部分和 b 侧的穿透部分所确定，这样：

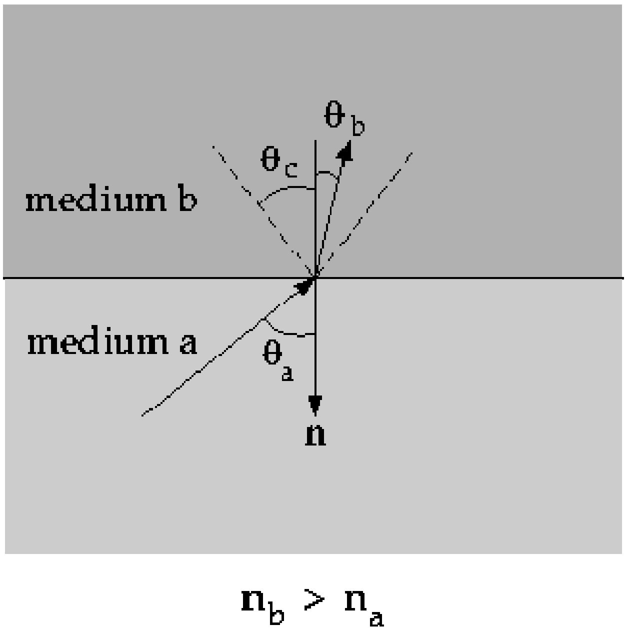
$$I_{w,a}(\vec{s}_r) = r_a(\vec{s})I_{w,a}(\vec{s}) + \tau_b(\vec{s}')I_{w,b}(\vec{s}') \qquad (11.3.54)$$

其中，$\tau_b(\vec{s}')$为界面b侧沿方向$\vec{s}'$的穿透率。同理，b界面侧沿方向$\vec{s}_t$的出射辐射强度$I_{w,b}(\vec{s}_t)$为 ：

$$I_{w,b}(\vec{s}_t)=r_b(\vec{s})I_{w,b}(\vec{s})+\tau_a(\vec{s}')I_{w,b}(\vec{s}') \qquad (11.3.55)$$

对于$n_a<n_b$的情况，以2π立体角从介质a穿透到介质b的辐射能量必然会产生一个角度为θ_c（图 11.3.9）的折射锥：

$$\theta_c=\sin^{-1}\frac{n_a}{n_b} \qquad (11.3.56)$$



图表 11 折射临界角θ_c

同理，若辐射以角度θ_c从介质b穿透到介质a，那么，折射后的角度为2π。若入射辐射角度大于θ_c，那么，所有的入射辐射能量将发生镜面反射而重新进入介质b中。

若截至扩展到流体计算域中，方程 11.3-54 中的$I_{w,b}(\vec{s}')$将被视为设定项。此项边界条件的设定是通过设定入射辐射热流和相应的立体角俩确定的。外部介质的折射率假定为 1.0。

漫反射的半透明壁面

在很多工程问题中，半透明界面均是漫射表面。此种情况下，界面反射率$r(\vec{s})$与反射方向$\vec{s}$无关，并且等于半球平均值r_d。若$n=n_a/n_b>1$，$r_{d,a},r_{d,b}$为[211]：

$$r_{d,a} = 1 - \frac{\left(1 - r_{d,b}\right)}{n^2} \qquad (11.3.57)$$

$$r_{d,b} = \frac{1}{2} + \frac{(3n+1)(n-1)}{6(n+1)^2} + \frac{n^2\left(n^2-1\right)^2}{\left(n^2+1\right)^3}\ln\left(\frac{n-1}{n+1}\right) - \frac{2n^3\left(n^2+2n-1\right)}{\left(n^2+1\right)\left(n^4-1\right)} + \frac{8n^4\left(n^4+1\right)}{\left(n^2+1\right)\left(n^4-1\right)^2}\ln(n)$$

（11.3.58）

界面 a 侧的所有出射方向的辐射强度为：

$$I_{w,a} = \frac{r_{d,a} q_{in,a} + \tau_{d,b} q_{in,b}}{\pi} \qquad (11.3.59)$$

同理，对于 b 侧：

$$I_{w,b} = \frac{r_{d,b} q_{in,b} + \tau_{d,a} q_{in,a}}{\pi} \qquad (11.3.60)$$

其中：

$$q_{in,a} = -\int_{4\pi} I_{w,a} \vec{s} \bullet \vec{n} d\Omega, \quad \vec{s} \bullet \vec{n} < 0 \qquad (11.3.61)$$

$$q_{in,b} = -\int_{4\pi} I_{w,b} \vec{s} \bullet \vec{n} d\Omega, \quad \vec{s} \bullet \vec{n} \geq 0 \qquad (11.3.62)$$

与上述的相同，若介质 b 扩展到流体计算域，$q_{in,b}$ 就成为边界条件设定项了。

辐照边界条件

正如上文所述，FLUENT 允许用户在半透明边界设定辐照热流。辐照热流的单位为入射辐射热流的单位（W/m^2）。用户可以设定辐照的立体角以及立体角中心向量。为了表示辐照发生镜面反射还是漫反射，用户可以设定漫射分数。

对于非灰体辐射，FLUENT 允许用户在半透明边界设定基于波带的辐照热流。对于每个波带，辐照热流的单位为入射辐射热流的单位（W/m^2）。与灰体辐射相同，用户可以设定辐照的立体角以及立体角中心向量。

漫射分数

在半透明边界，FLUENT 允许用户设定入射辐射发生漫反射的比例。漫射部分的处理与上述的相同，穿透部分的辐射也是漫射（与穿透后的方向无关）。入射能量的其余部分则作为镜面反射处理。

对于非灰体辐射，用户可以在每个波带内设定相应漫射分数。

镜面和对称面的边界条件

对于镜面和对称面，某个入射方向 $\vec{s}$ 对应着一个反射方向 $\vec{s}_r$，由方程 11.3-50 确定。且：

$$I_w\left(\vec{s}_r\right) = I_w\left(\vec{s}\right) \qquad (11.3.63)$$

周期性对称面的边界条件

若使用旋转周期对称面时，为了确保辐射能够以正确的方式经由对称面进行传播，使用像点很重要。推荐使用的像点设置为 $3\times3 \sim 10\times10$。

流动入（出）口的边界条件

此类边界的处理请参阅 11. 3. 3 节。

11.3.7 多表面辐射传热模型

多表面辐射传热模型可计算出在封闭（区域）内的漫灰表面之间的辐射换热。两个表面间的辐射换热量依赖于它们的尺寸、间距和方向。这种特性可以用一个被称为“角系数（视系数）”的几何量来度量。

多表面辐射传热模型的主要假定是忽略了所有的辐射吸收、发射和散射，因此，模型中仅考虑表面之间的辐射传热。

漫灰辐射

FLUENT 中的多表面辐射换热模型假定辐射面均为漫灰表面。灰表面的辐射发射和吸收与波长无关。同时，由基尔霍夫定律[161]可知，（热平衡时）物体的辐射发射率等于其对黑体辐射的吸收比（$\varepsilon = \alpha$）。对于漫反射表面，其反射率与入射方向以及反射方向无关。

FLUENT 中使用的就是漫灰表面模型。另外，正如前文所述，对于我们所感兴趣的量来说，表面之间的辐射换热量实际上并不受到隔开这些表面的介质的影响。这样，由灰体假设，如果表面接受到一定的入射辐射（E），那么，一部分被反射（ρE），部分被吸收（αE），剩余的则穿过表面物体（τE）。对于具体问题中遇到的多数表面，其对热辐射（红外谱段）是不可穿透的，因此，可以认为这些表面是非透明的。所以，我们可以忽略掉辐射的穿透率。

从能量守恒有，$\alpha + \rho = 1$，又由于$\alpha = \varepsilon$（发射率、黑度），因此$\rho = 1 - \varepsilon$

多表面辐射换热模型方程

离开某个表面的辐射由自身辐射和对入射辐射的反射组成。反射的部分依赖于周围物体对其的入射辐射，而这部分（入射）辐射可表示成其余表面（发出）的辐射热流。对于表面k，其发出的总辐射热流为:

$$q_{out,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{in,k} \qquad (11.3.64)$$

其中，$q_{out,k}$为离开表面的总辐射热流，ε_k为发射率，σ为斯蒂芬-玻尔兹曼常数，$q_{in,k}$为从周围物体发出的入射辐射热流。

某个表面接受到其余表面的入射辐射量是这两个表面的“角系数”，F_{jk}的函数。角系数F_{jk}的含义就是离开表面k的辐射量被表面j所接收到的比例。某个表面k的入射辐射热流可表示成其余表面离开的辐射热流的函数：

$$A_k q_{in,k} = \sum_{j=1}^{N} A_j q_{out,j} F_{jk} \qquad (11.3.65)$$

其中，A_k为表面的面积，F_{jk}为表面之间的角系数。对于N个表面，由角系数的倒数（相对性）关系有：

$$A_j F_{jk} = A_k F_{kj},\ j = 1,2,3,\ldots N \qquad (11.3.66)$$

因此有：

$$q_{in,k} = \sum_{j=1}^{N} F_{kj} q_{out,j} \qquad (11.3.67)$$

并且：

$$q_{out,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k \sum_{j=1}^{N} F_{kj} q_{out,j} \qquad (11.3.68)$$

上式可写为：

$$J_k = E_k + \rho_k \sum_{j=1}^{N} F_{kj} J_j \qquad (11.3.69)$$

其中，J_k 代表从表面发出的辐射，E_k 代表表面 k 的自身辐射。上式共有 N 个方程，用矩阵表示为：

$$KJ = E \qquad (11.3.70)$$

其中，K 为 $N \times N$ 矩阵，J 为辐射向量，E 为表面自身辐射向量。
方程 11.3-70 称为辐射矩阵方程。两个有限大小表面 i, j 之间的角系数为：

$$F_{ij} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} \delta_{ij} dA_i dA_j \qquad (11.3.71)$$

其中，δ_{ij} 由（微元）面积 dA_j, dA_i 之间的可视性（角度）确定。若两者可相互看到（即连接两个微元面的直线位于域内），$\delta_{ij} = 1$；否则，$\delta_{ij} = 0$。

表面束

当辐射面的数量很大时，表面辐射模型的计算量非常庞大。为了减少计算时间和存储需求，我们可以通过创建“表面束”来减少辐射表面数目。表面束由一个表面加上其临近的多个表面，直到表面数目达到设定的每个表面束的总数。
对于表面束，我们可计算得到辐射向量 J。此值被分配到组成表面束的各个表面以计算各个表面的温度。由于辐射源相的高度非线性（与温度的四次方成比例），用户必须仔细计算表面束的温度以及辐射热流、源相在组成这些表面束的各个表面之间的分配。

表面束的温度由面积加权平均得到：

$$T_{sc} = \left(\frac{\sum_f A_f T_f^4}{\sum A_f} \right)^{1/4} \qquad (11.3.72)$$

其中，T_{sc} 为表面束的温度，A_f, T_f 为表面 f 的面积与温度。求和是对组成表面束的所有表面进行的。

光顺处理

对于角系数的光顺处理强制其遵守倒易关系（相对性）和守恒特性。
角系数的倒易关系为：

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \qquad (11.3.73)$$

其中，A_i 为表面 i 的面积，F_{ij} 为表面 i,j 之间的角系数，F_{ji} 为表面 j,i 之间的角系数。

一旦强制角系数遵守倒易关系后，可用最小二乘法来对角系数的守恒特性进行光顺处理。守恒关系为：

$$\sum F_{ij} = 1.0 \qquad (11.3.74)$$

11.3.8 燃烧过程的辐射

灰气体加权平均模型（WSGGM）

灰气体加权平均模型（WSGGM）是介于过分简化的完全灰气体模型与完全考虑每个气体吸收带模型之间的折衷模型。WSGGM 的基本假设是对于一定厚度的气体吸收层，其发射率为：

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^{I} a_{\varepsilon,i}(T)\left(1 - e^{-\kappa_i ps}\right) \qquad (11.3.75)$$

其中，$a_{\varepsilon,i}$ 为第 i 组“假想”灰气体的发射率加权系数，括号内的量是第 i 组“假想”灰气体的发射率，κ_i 为第 i 组“假想”灰气体的吸收系数，p 为所有吸收性气体的分压的总和，s 为辐射的行程长度。对于 $a_{k,i}, \kappa_i$ 和，FLUENT 使用由文献[41] and [219]给出的数值。这些数值依赖于气体组成，$a_{k,i}$ 还依赖于气体温度。当气体总压不等于 1atm 时，应对 κ_i 进行相应的比例缩放（请参阅方程 11.3-81）。

对于开口区，由于其较高的光谱吸收率，$i = 0$ 组分的吸收系数设为 0，其吸收系数的加权值由文献[219]得到：

$$a_{\varepsilon,0} = 1 - \sum_{i=1}^{I} a_{\varepsilon,i} \qquad (11.3.76)$$

依赖于温度的 $a_{\varepsilon,i}$ 可由任一种函数近似（拟合），但一般采用如下形式：

$$a_{\varepsilon,i} = \sum_{j=1}^{J} b_{\varepsilon,i,j} T^{j-1} \qquad (11.3.77)$$

其中，$b_{\varepsilon,i,j}$ 为关于气体温度的多项式的系数。系数 $b_{\varepsilon,i,j}, \kappa_i$ 是通过对方程 11.3-45 进行拟合得到，拟合的气体总黑度实验数据来自[41, 49, 219]。

壁面的辐射吸收 α 可以用相似的方法进行拟合近似[219],，但为了简便起见，通常假定 $\varepsilon = \alpha$ [160]。除了（气体）介质的光学深度较小或者是壁面温度与气体温度差异较大的情况外，上述的假设还是合理的。

由于系数 $b_{\varepsilon,i,j}, \kappa_i$ 在较小的程度上还依赖于 ps, T，因此，在这些参数的较大变化范围之内，可以认为此系数为常数。文献中，在总压保持在 1atm 情况下，对于不同的 CO_2 和 H_2O（蒸汽

态）分压，上述的系数均保持为常数。此文献的系数值的实验验证范围为 $0.001 \le ps \le 10.0 atm-m$，以及 $600 \le T \le 2400K$。若 $T > 2400K$，系数值采用文献[41]中的数据。若对于所有的 i 组分，$\kappa_i ps$ 方程 11.3-75 简化为：

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^{I} a_{\varepsilon,i}\kappa_i ps \qquad (11.3.78)$$

对比方程 11.3-78 与灰气体模型的（气体）吸收系数 a，可以发现，WSGGM 模型中穿越一定距离 s 后辐射强度的变化与灰气体模型中经由吸收系数得到的变化值是一致的。

$$a = \sum_{i=0}^{I} a_{\varepsilon,i}\kappa_i p \qquad (11.3.79)$$

此项吸收系数不依赖于 s。一般情况下，a 大致为：

$$a = -\frac{\ln(1-\varepsilon)}{s} \qquad (11.3.80)$$

其中，WSGGM 中的发射率（黑度）ε 由方程 11.3-75 计算得到。由方程 11.3-80 所定义的 a 依赖于 s，它反映了气体分子对热辐射吸收的非灰体特性。FLUENT 中，方程 11.3-79 适用于 $s \le 10^{-4}m$，方程 11.3-80 适用于 $s > 10^{-4}m$。需要注意得是，若 $s \approx 10^{-4}$，由方程 11.3-79 和 11.3-80 所计算得到的 a 值大致相当（因为方程 11.3-80 在 s 很小时可转化为出方程 11.3-79）。

FLUENT 允许用户将设定为计算单元的特征尺寸或者是平均射线（行程）长度（即辐射壁面之间的平均直线长度）。若问题中的介质具有各相同性属性，并且用户主要关心的是封闭区域内各个避免之间的辐射传热，那么，可使用基于平均射线（行程）长度的 WSGGM 模型。用户既可以自己设定平均射线（行程）长度也可以让 FLUENT 计算得到。若用户主要关心的是临近单元间的辐射换热（例如，加热元件周围的辐射分布。在介质光学深度较大时－P-1 模型不适用－这种情况常常发生），那么，使用基于计算单元特征尺寸的 WSGGM 模型更好。需要注意的是，当较小时，由基于计算单元特征尺寸的 WSGGM 计算出的 a 值或多或少的依赖于网格尺寸。但由于辐射能与 T^4 成正比，因此，这种计算结果的网格依赖性并非必然的要影响到温度分布的精确预测。基于计算单元特征尺寸的方法可以得到较好的温度分布（预测），而基于平均射线（行程）长度的方法可以得到更精确的壁面热流（预测）。关于 WSGGM 模型的各种属性设定，请参阅 7.6.1 节。

!! 在使用非灰体的 DO 模型时，WSGGM 不能用于对每个波带的吸收系数进行设定。若在非灰体 DO 模型中使用 WSGGM 模型，每个波带的吸收系数都相同。

若 $p_T \ne 1atm$

正如上文介绍的，WSGGM 模型中假定 p_T－总（静）压－等于 1atm。若 p_T 不等于 1atm（例如在高温燃烧的情况），则使用文献[59]中的比例缩放法则来进行修正。当 $p_T < 0.9atm$ 或 $p_T > 1.1atm$，方程 11.3-75 和 11.3-79 中的 κ_i 变为：

$\kappa_i \to \kappa_i p_T^m$ （11.3.81）

其中，m 为从文献得到得无量纲数，它依赖于吸收性气体得分压和温度T，同时也依赖于（总压）p_T。

碳黑（SOOT）对吸收系数得影响

再计算碳黑得生成时，FLUENT 可以计算出碳黑浓度对辐射吸收系数得影响。一般的碳黑模型通过计算有效吸收系数来考虑碳黑对辐射传热得影响。然后，把纯气体的吸收系数与纯碳黑的吸收系数相加就得到碳黑与（对辐射具有）吸收气体混合物的吸收系数：

$a_{s+g} = a_s + a_g$ （11.3.82）

其中，a_g 为由 WSGGM 模型得到的气体（不包含碳黑）的吸收系数，并有：

$a_s = b_1 c_m [1 + b_T (T - 2000)]$ （11.3.83）

其中，c_m 为碳黑浓度（kg/m^3）.

系数b_1, b_T 是由文献[199]通过对 Taylor-Foster 近似 [240]和 Smith et al.近似 [219]的实验数据对方程 11.3-83 进行拟合得到。

关于碳黑对辐射的影响的设定请参阅 7.6 与 17.2.3 节。

颗粒对辐射吸收系数的影响

只要用户使用了 P-1 或 DO 辐射模型，FLUENT 可以计算离散相颗粒对辐射吸收系数的影响。一旦激活了 P-1 或 DO 辐射模型，就可以再激活颗粒的辐射吸收系数。然后，颗粒（对辐射）的发射、发射和散射效应就可以包含在系统的辐射换热中。关于离散相的辐射属性设定的细节请参阅 19.11 节。

11.3.9 辐射模型使用概览

设定和求解一个辐射问题的大致步骤如下文所述，其细节请参阅 11.3-10～11.3.18 节。下文仅对与具体辐射模型相关的设定（求解）步骤有所述及。对于与辐射换热耦合的其它模型的设定项，请参阅那些模型相应的章节。

1. 选择辐射模型，请参阅 11.3.10 节
2. 若用户使用 DTRM 模型，请定义跟踪射线（11.3.11 节）；若使用 S2S 模型，计算出或读取角系数（11.3.12 节）；若使用 DO 模型，定义离散的角度（11.3.13 节），若需要，还需设定非灰体辐射参数（11.3.14 节）。
3. 设定介质属性（11.3.15 节）。
4. 设定边界条件（11.3.16 节）。若用户模型中包含有半透明介质，请参阅下面的介绍来设定半透明介质。
5. 设定求解参数（DTRM、DO、S2S、P-1，11.3.17 节）。
6. 求解（11.3.18 节）。

设定半透明介质

作为上述步骤的第四步，用户需要按下面的步骤来设定诸如玻璃的半透明介质。

1. 若半透明介质为固体，那么，在固体区（的设定选项中）激活辐射计算项（11.3.16 节）。

若半透明介质为流体，此步就不需要了。

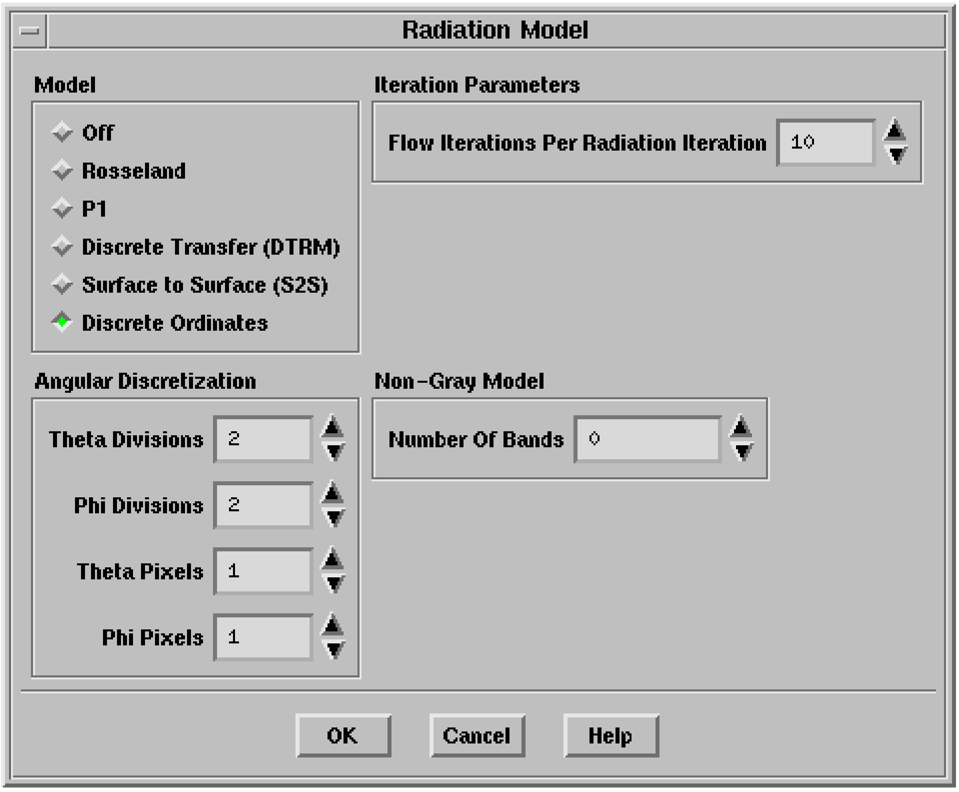
2. 在半透明介质与流体计算域或者相接的半透明介质的交界面设定相应的两个壁面均为半透明界面（semi-transparent 11.3.16 节）。这个设定将会激活通过界面的辐射计算，同时还会计算界面处的反射、折射。
3. 在外部半透明边界处设定外部边界为半透明边界条件（semi-transparent 11.3.16 节）。这个设定将使得外部辐射热流可进入内部流域或者是内部辐射进入外部区域。外部辐射或内部辐射在穿越此界面时，在界面处均将发生相应的折射或反射。
4. 设定界面处的漫反射的比例（diffuse fraction，11.3.16 节）。
5. 对固体区域在界面处设定其折射系数（在 **Materials** panel 面板中）。

若用户并不关心半透明介质内的温度分布，那么，可以设定半透明壁面（thin semi-transparent wall）而不需要设定半透明固体区（semi-transparent solid zone，请参阅 11.3.16 节）。

11.3.10 辐射模型的选择

用户可在 **Radiation Model** panel 面板中（图 11.3.10）选定某个辐射模型来激活辐射换热。

Define →Models →Radiation...



图表 12 辐射模型面板（DO 模型）

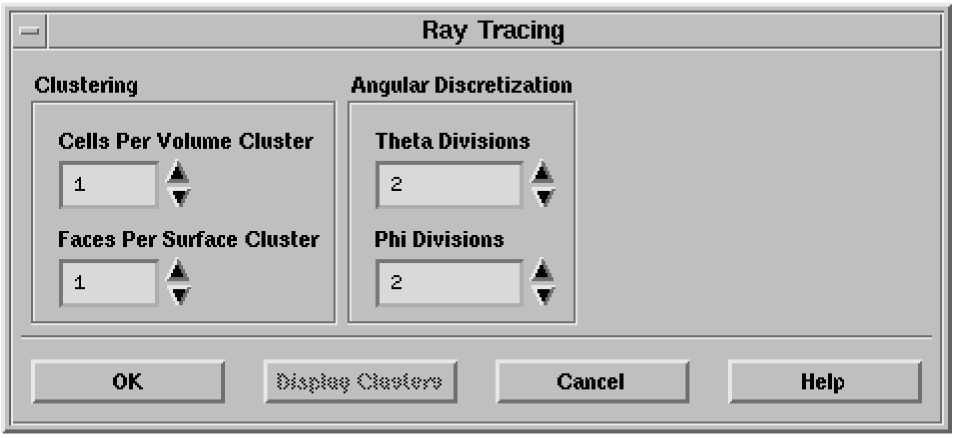
在 **Model** 属性框下可以选择 **Rosseland**, **P1**, **Discrete Transfer (DTRM)**, **Surface to Surface (S2S)**, 或 **Discrete Ordinates**。若要屏蔽辐射，选择 **Off**。需要注意的是，当激活 DTRM 、DO 或 S2S 模型，辐射模型面板（**Radiation Model**）将会扩展以包含相应的设定参数（请分别参阅 11.3.12、11.3.13、11.3.14、11.3.17 节。选定某个辐射模型之后，其它的参数不会出现在面板中。

!! 辐射模型只能使用分离式求解器。

一旦激活辐射模型之后，每轮迭代过程中能量方程的求解计算就会包含有辐射热流。若在设定问题时激活了辐射模型，而又希望将它禁止掉，那么，用户必须在 **Radiation Model** 面板中选定 **Off** 选项。
另外，若用户激活了辐射模型，FLUENT 就会自动激活能量方程的计算，而不需要用户再单独回头去激活能量方程。

11.3.11 离散传播模型的跟踪射线的定义

当用户在 **Radiation Model** 面板中选定了 **Discrete Transfer** 模型并点击 **OK** 按钮之后，**Ray Tracing** panel 面板（图 11.3.11）将自动弹出（若用户在随后的模型设定或求解计算过程中想修改当前设置，可使用 **Define/Ray Tracing...**菜单项手动弹开此面板）。



图表 13 射线跟踪面板（Ray Tracing）

在此面板中，用户需要设定参数并创建射线（束），请参阅 11.3.3 节。
设定步骤如下：

1. 确定(辐射面或辐射体的)辐射表面或吸收性单元的数目，可在 **Cells Per Volume Cluster** 和 **Faces Per Surface Cluster** 文本框中给定（请参阅下面的解释）。
2. 确定跟踪射线的数目，可在 **Theta Divisions** 和 **Phi Divisions** 文本框中设定相应的数值（详细介绍见下）。
3. 当在 **Ray Tracing** 面板中点击 **OK** 按钮之后，会弹出 **Select File** dialog box 对话框，要求用户给定此跟踪射线文件（``ray file"）的名称。在给定文件名并把数据写入文件之后，FLUENT 再从文件中把数据读到内存并在计算中使用。细节请见下文。

!! 若用户未写入然后读出跟踪射线文件，接着就取消了 **Ray Tracing** 面板（点击 **Cancel** 按钮或直接关闭了窗口），DTRM 辐射模型就不会被激活。

确定辐射面或辐射体

用户在 **Cells Per Volume Cluster** and **Faces Per Surface Cluster** 区域的输入将确定了辐射面和辐射体内包含的计算单元数。缺省情况下，两项均设定为 1，因此表面束（辐射面）的数目就等于边界面（单元）的数目；辐射体（辐射吸收单元体）的数目就等于计算域内的单元总数。对于二维问题，这些数目是可以承受的，但对较大规模的问题，为了减少跟踪射线的计算量，用户需要减少辐射面与辐射体内所包含的单元数目（关于辐射面、辐射体请参阅 11.3.3 节）。

确定射线（束）

用户在 **Theta Divisions** and **Phi Divisions** 区域的输入将确定每个辐射面所跟踪计算的射线束

的数目。

Theta Divisions 确定了表米上围绕 P 点，用于计算立体角的θ角方向的间隔数。立体角的设定基于的θ角的变化范围为$0^{\circ}\sim 90^{\circ}$（图 11.3.2），其缺省设置为 2，这表示从此表面发出的射线间隔角度为45°（θ角方向）。

Phi Divisions 确定了表米上围绕 P 点，用于计算立体角的ϕ角方向的间隔数。立体角的设定基于的θ角的变化范围为$0^{\circ}\sim 180^{\circ}(2D)$和$0^{\circ}\sim 360^{\circ}(3D)$（图 11.3.2），其缺省设置为 2，这表示从此表面发出的射线间隔角度为$90^{\circ}(2D)$（ϕ角方向）。此设定与上述的θ角的缺省设置一起表明了在每个辐射面将会跟踪 4 条射线（2D）。需要注意的是，对于 3D 情况，若要达到上述的相同精度，**Phi Divisions** 的设定需为 4。多数情况下，推荐用户至少把θ和ϕ角的设定数目加倍。

写入/读取 DTRM 跟踪射线文件

在用户激活 DTRM 模型，并已设定了各种确定跟踪射线的参数之后，必须创建射线文件，然后此文件被读入以用于辐射计算。此跟踪射线文件包含有对所跟踪射线的历程描述数据（行程长度、每条射线穿越的单元的标识等）。为了加快计算，这些信息存储于射线文件中，而不是每次（辐射迭代）再重新计算。

缺省情况下，射线文件以二进制格式存储。用户可以在 **Select File** dialog box 对话框中弃选 **Write Binary Files** 选项，使用文本格式存储射线文件。

!! 因为 FLUENT 不能从压缩的射线文件中读取需要的信息，所以用户不要写入或读取压缩性的射线文件。

射线文件名一旦设定后，就不要进行修改。此后，文件名被存 CASE 文件中，在读取 CASE 文件时，射线文件会自动读入 FLUENT 中。读取 CASE 时，当读完其余部分后，程序提示用户正在读取射线文件（信息输出在控制台文本窗口）。

需要注意的是存储在 CASE 文件中的射线文件名并不包含存储射线文件路径的全部名称。只有当用户在通过 GUI 读入射线文件时（或者在文本界面时，输入的文件名包含路径），包含路径的文件名才可存储在 CASE 文件中。当没有全路径的文件名时，自动读取射线文件可能会出错（因为 FLUENT 无法找到此文件），这样用户必须使用 **File/Read/Rays...**菜单项亲自提供此文件名。最保险的办法是在开始从 GUI 读入射线文件或者是在文本界面直接输入全路径名称。

!!一旦网格发生如下的更改，射线文件必须重新创建：

- 改变边界区类型
- 调整或重新排序网格（矩阵）
- 缩放网格
- 将 2D 问题更改为轴对称问题或者相反的过程

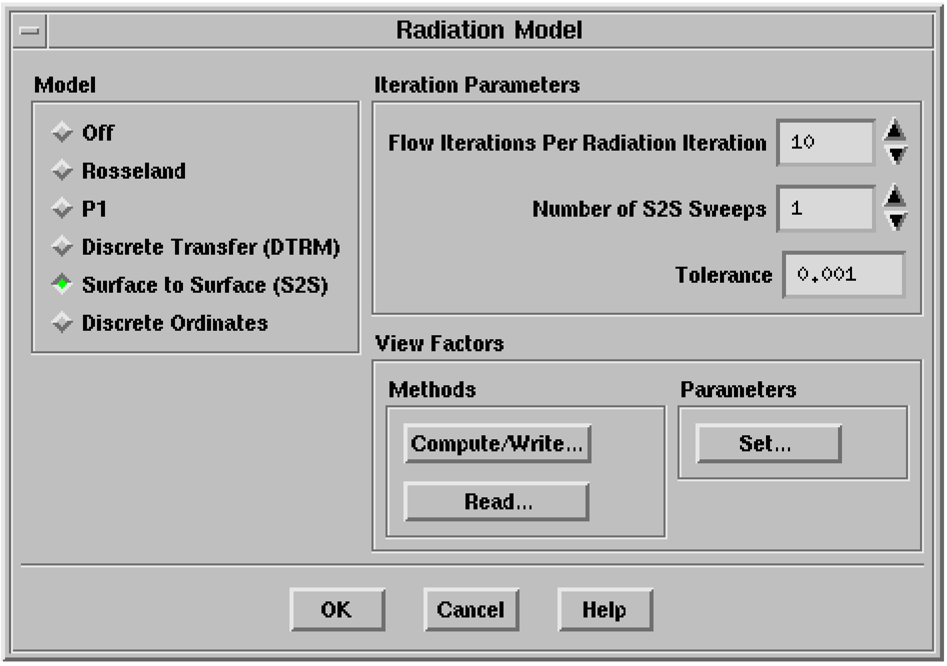
用户可通过 **Define/Ray Tracing...**菜单项打开 **Ray Tracing** panel 面板。

显示射线束

一旦创建了射线文件或手动读入后，用户可在 **Ray Tracing** 面板中点击 **Display Clusters** 按钮来图形化显示计算域内的射线束。关于射线（束）的显示请参阅 11.3.20。

11.3.12 表面辐射模型中角系数的计算与数据读取

当选定 **Surface to Surface (S2S)**模型时，**Radiation Model** 面板就会扩展（图 11.3.12)。在此面板中，用户可以计算相应的角系数或读取先前计算好的角系数到 FLUENT 中。



图表 14 辐射模型面板（S2S 模型）

当有大量辐射面时，S2S 辐射模型的计算量很大。为了减少计算量与存储需求，可通过创建辐射面（束）来减少需要计算的辐射面数量。表面（束）的相关信息（节点的坐标与连接信息、表面束的标识）可用来计算相应 面（束）的角系数。

!! 一旦网格发生如下的更改，射线文件必须重新创建：

- 改变边界区类型
- 调整或重新排序网格（矩阵）
- 缩放网格
- 将 2D 问题更改为轴对称问题或者相反的过程

需要注意的是在壳体（壁面）的热传导无论激活与否，用户都不需要重新计算角系数。关于壳体（壁面）的热传导请参阅 6.13.1 节。

角系数计算

FLUENT 可以在当前工作阶段（session）计算角系数并加以存储至文件中，已备当前户随后的工作阶段使用。用户可以将表面束信息和角系数计算参数存储于文件中，在 FLUENT 之外计算角系数，然后将计算结果读入 FLUENT。下面介绍这种角系数计算方法。

!! 对于网格数量巨大和复杂几何模型，推荐使用在 FLUENT 之外角系数，然后在开始计算模拟之前把角系数读入 FLUENT。

在 FLUENT 中计算角系数

若在当前 FLUENT 工作阶段计算角系数，用户应首先在 the **View Factor and Cluster Parameters** panel 面板中设定角系数计算参数（细节如下)。设定完角系数与表面束参数后，在 **Radiation Model** panel.面板中的 **Methods** 选项下点击 **Compute/Write...**按钮。弹出一个 **Select File** 对话框，提示用户给定用于存储表面束和角系数信息文件的名称。给定文件名之

后，FLUENT 将把表面束信息写入文件中。FLUENT 将用表面束信息来计算角系数，并把结果写入同名文件中，然后，自动从文件中读取角系数。

在 FLUENT 之外计算角系数

为了要在 FLUENT 之外计算角系数，用户必须将表面束信息和角系数参数存储与文件中。

File →Write →Surface Clusters...

FLUENT 将打开 **View Factor and Cluster Parameters** panel 面板，在此面板中，用户可以设定角系数和表面束计算参数（细节见下）。在 **View Factor and Cluster Parameters** 面板中点击 **OK** 按钮之后，弹出一个 **Select File** 对话框，提示用户给定用于存储表面束和角系数信息文件的名称。给定文件名之后，FLUENT 将把表面束信息写入文件中。若给定的文件名以结尾，相应的文件压缩命令就会进行（关于文件压缩请参阅 3.1.5 节）。

为了在 FLUENT 之外计算角系数，可输入下列的任一命令行：

- 对于串行计算机：

utility viewfac *inputfile*

其中，*inputfile* 为用户使用 FLUENT 存储表面束信息和角系数参数的文件名或者是全路径文件名。用户可以把角系数读入 FLUENT，入下面所述。

- 对于网络并行处理计算机：

utility viewfac -p -t *n* -cnf= *host1,host2, ...,host n inputfile*

其中，*n* 为计算结点总数，*host1,host2, ...*为相应用到的机器名（节点）。

!! 需要注意的是 *host1* 必须是主节点机。

- 对于多处理器的并行处理计算机：

utility viewfac -t *n inputfile*

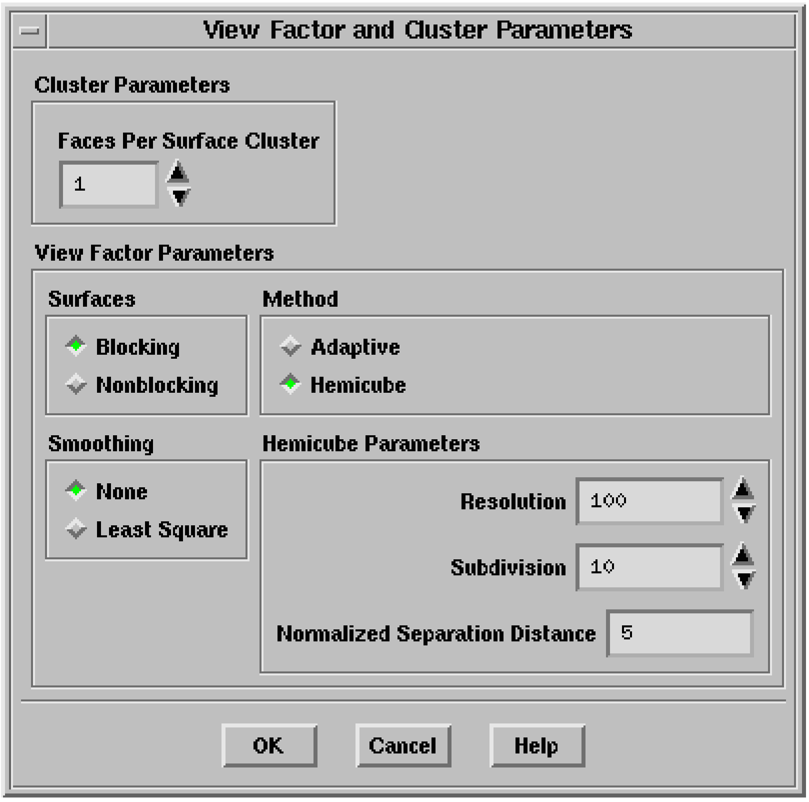
!! 需要注意的是，对于使用 *n* 个处理器（节点）的并行处理计算机，问题被复制到每个处理器上。例如，如果对于单 CPU，角系数的计算需要 100MB 的 RAM 进行存储，那么，在个处理器上，它总共需要 100X *n* MB 的 RAM 进行存储和计算。

把角系数读入 FLUENT 中

在角系数计算完成(在 FLUENT 之内和之外)并存于文件之后，用户就可以把结果读入 FLUENT 中。要读取角系数，可在 **Radiation Model** panel 面板中的 **Methods** 选项下点击 **Read** 按钮，弹出一个 **Select File** 对话框，提示用户给定用于存储表面束和角系数信息文件的名称。用户也可以通过 **File/Read/View Factors...**菜单项手动来给定角系数文件。

设定角系数和表面束参数

用户可以使用 **View Factor and Cluster Parameters** 面板（图 11.3.13）来为 S2S 模型设定角系数和表面束参数。为了打开此面板，可在 **Radiation Model** panel 面板中的 **Parameters** 选项下点击 **Set...**按钮或者是使用 **File/Write/Surface Clusters...**菜单项。



图表 15 角系数与表面束参数设定面板

控制表面束

用户在 **Faces Per Surface Cluster** 下的输入将决定辐射面的数量。缺省情况下，其值为 1。因此，表面束的数目将等于边界面（单元）的数目。对于 2D 问题，这个数量是可接受的。对于大规模问题，用户可能会希望减少表面束的数目。从而减少角系数文件的大小和对内存的需求。但是，表面束的减少是以牺牲计算精度为代价的（关于表面束的细节请参阅 11.3.7 节）。

某些情况下，为了控制表面束的分割质量，用户可能希望修改单一表面束内的相邻单元之间的夹角－分割角（cutoff or ``split'' angle）。此分割角确定了相邻单元组成同一表面束的标准。分割角越小，角系数的代表性就越好。缺省情况下。此分割角（相邻单元法向夹角）小于 20^0。为了修改此数值，用户可使用 split-angle 文本行命令：

define →models →radiation →s2s-parameters →split-angle

或者是：

file →write-surface-clusters →split-angle

设定表面对之间的方向

角系数的计算依赖于两个表面（对）之间的几何方位。在表面对的检查中可能存在两种情况：

- 两个表面之间没有阻碍物，他们被称为非阻碍面（``non-blocking''）。
- 若有其它表面阻碍了两个表面之间的视线，他们被称为被阻碍面（``blocking''）。这种阻挡会改变两个面之间的角系数数值，因此需要在进行另外的计算以获得正确的角系数数值。

对于有阻碍面的情况，在 **View Factor and Cluster Parameters** 面板中的 **Surfaces** 选项下选定 **Blocking**；对于非阻碍面，用户既可以选择 **Blocking** 也可以选择 **Nonblocking**，而这都不影响计算精度。但是，这种情况下最好是选择 **Nonblocking**，因为这个选项所花费的计算时

间更少。

选择（角系数）光顺（Smoothing）方法

为了强制使角系数遵从倒易关系和守恒特性（11.3.7 节），可以对角系数矩阵实行光顺处理。为了使用最小二乘法来光顺角系数矩阵，在 **View Factor and Cluster Parameters** 面板中的 **Smoothing** 选项下选定 **Least Square**。若不想对角系数矩阵进行光顺处理，可以在 **Smoothing** 选项下选定 **None**。

选择角系数计算方法

FLUENTR 提供两种计算角系数的方法：半球方法（hemicube method，单位球法）和自适应方法（adaptive method）。单位球法仅适用于 2 D 情况。

角系数的自适应计算方法是基于某对面，计算过程中，可根据面之间的接近程度而分别使用不同的代数方法（分析法或高斯积分法）。为了保证计算精度，两个面月接近，那么，积分阶次就越高。对于彼此非常靠近的表面，则使用分析方法。FLUENT 通过面之间的可视程度（可视性）来确定所使用的方法。若某个表面发出恶的射线不被另外的面说阻挡，就使用高斯积分方法；若一部分射线被阻挡，那么，就使用蒙特卡罗积分方法或者是准蒙塔卡罗积分方法。

若要使用自适应方法来计算角系数，在 **View Factor and Cluster Parameters** 面板中选择 **Adaptive** 选项。对于简单的几何模型，推荐使用自适应方法，因为对于此类几何体，自适应方法比单位球法要快。

单位球法使用对面积的微分方法，并且是基于“行”（把辐射面分割成一个个条带）的计算方法。对有微分计算得到的角系数求和就得到了整个表面的角系数。这种方法起源于计算图形学中辐照强度（光学中的亮度）的计算[40].。

若要使用单位球法计算角系数，在 **View Factor and Cluster Parameters** panel 面板中选定 **Hemicube** 选项。对于大型复杂几何体，推荐使用此方法。这是因为对于此类几何体，单位球法的计算速度更快。

单位球法是基于表面几何特性的三个假设：重叠性、可视性和接近性。为了检验这三种假设，用户可以设定用以提高角系数计算精度的三个（单位球法）参数。多数情况下，缺省的设置是足够精确的。

- 重叠性——通过对半球面的有限分解，用户可以精确得到每个可视面在半球面上的投影面积。如上文所述，辐射表面均会投影到半球面上。因为半球面只是作有限分解（展开），投影后的面积和角系数可能会被过高／低估计。通过增加 **Hemicube Parameters** 属性框下的 **Resolution** 文本框的数值，重叠性的影响可以被减弱。
- 可视性——任意两个表面间的可视性不会发生变化。在某些情况下，表面 i 可从表面 k（的几何中心）完全看到，但另外某个表面 j 阻碍了从 i 看到表面 k。此种情况下，单位球法将过高估计表面 i 与 k 之间的角系数（从表面 i 的几何中心）。这种误差可以通过对表面 i 进行细分而减小。用户可以在 **Hemicube Parameters** 属性框下的 **Subdivision** 文本框中输入数值来设定细分面的数目。
- 接近性——相对于辐射面的有效直径，表面之间的距离很大。当对比于表面的有效直径，表面之间非常接近时，或者就是表面相连，那么，接近性假设就是有效的。此种情况下，某个面的中心与另外的面上的各个点之间的距离相差很大。又有角系数与距离为非线性关系。这样角系数的计算误差就很大。

  在 **Hemicube Parameters** 属性框下，用户可以设定表面法向距离（**Normalized Separation Distance**）限制，此设定项为最小面之间距离与有效表面直径之比。若计算出的法向距离小于设定值，此表面将被细分成一定数目的子面，直到其表面法向距离大

于设定值。另外，用户也可以通过在 **Subdivision** 文本框下输入数值来直接设定子面数目以创建子面。

11.3.13 DO 模型的离散角度设定

当用户选定 **Discrete Ordinates** 模型后，**Radiation Model** 面板将扩展以显示对于 **Angular Discretization** 的输入项（图 11.3.10）。本节将介绍角度离散和象点（pixelation）参数（11.3.6 节）的设定。

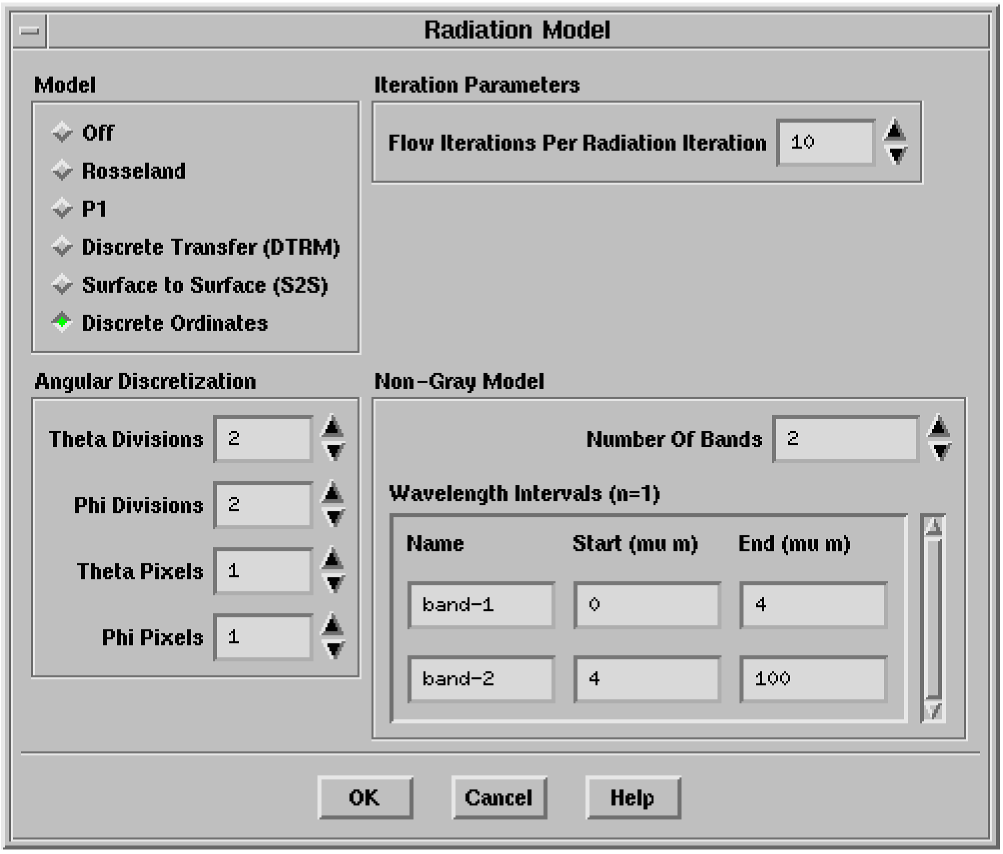
Theta Divisions （N_θ） 和 Phi Divisions （N_ϕ）将确定空间每个象限的离散控制角度的数量（图 11.3.3）。对于 2D 情况，（因为对称）FLUENT 只求解四个象限。这样，总共是求解 $4N_\theta N_\phi$ 个方向 $\vec{s}$；对于 3D 情况，求解 8 个象限，因而求解方向为 $8N_\theta N_\phi$。缺省情况下，Theta Divisions 和 Phi Divisions 的数目均为 2。对于多数实际问题，这个设置是足够的。更细的空间离散角的划分可以更好的求解出较小的几何特征或者是温度在空间的强烈不均匀性。但是 Theta Divisions 和 Phi Divisions 数目大这意味着加大计算代价。

Theta Pixels 和 **Phi Pixels** 可以用来确定象点（反应控制体单元的重叠，参见图 11.3.7 以及前面章节的介绍）。对于漫灰辐射，1×1 的缺省象点设置是足够的。对于具有对称面、周期性条件、（辐射）镜面或者是半透明边界，推荐使用 3×3 的象点设置。单应该注意到的是，增加象点数目将加大计算量。

11.3.14 DO 模型的非灰体辐射

若用户想用 DO 模型模拟非灰体辐射，可在 **Radiation Model** 面板（图 11.3.14）的扩展面板中的 **Non-Gray Model** 选项下设定 **Number Of Bands** (*N*)选项。对于 2D 模型，FLUENT 求解 $4N_\theta N_\phi N$ 个方向；对于 3D 模型，求解 $8N_\theta N_\phi N$ 个方向。缺省情况下，**Number of Bands** 被设定为 0，表明仅考虑灰体辐射。由于计算量与非灰体带的数目直接相关，用户应尽量减少灰带的数目。多数情况下，对于具体问题所遇到的温度范围所对应的主要辐射波长，（气体）吸收与壁面的发射率接近于常数。对于这种情况，使用灰体 DO 辐射模型会稍有误差。而对其它的情况，非灰体的特征很重要，但只需要较少的灰带即可。例如，对通常的玻璃而言，设定两三个灰带就足够了。

当 **Number Of Bands** 被设定非 0 时，**Radiation Model** 面板会再次扩展以显示出 **Wavelength Intervals** 选项（图 11.3.14）。用户可以对每个波长带设定名称（**Name**），同时设定波带的开始与结束波长（**Start** and **End**，单位为 μm）。需要注意的是，波带的设定是基于真空的（$n=1$）。在对于具有不等于 1 的折射率 n 的实际介质波带，FLUENT 将自动考虑介质折射率对波带的影响。



图表 16 辐射模型面板（非灰体 DO 模型）

当穿越半透明界面时。辐射频率保持不变，但波长发生变化以保证 $n\lambda$ 为常数。这样，当辐射从穿越折射率为 n_1 的介质到折射率为 n_2 的介质时，辐射具有如下关系：

$$n_1\lambda_1 = n_2\lambda_2 \qquad (11.3.84)$$

其中，λ_1,λ_2 为辐射在两种介质内的对应波长。设定辐射波长比设定频率更方便。对于（辐射）均匀的介质，FLUENT 要求用户设定波带时将折射率设定为 1。

例如，对于某种玻璃，其具有某个吸收系数的间断点，间断点对应的波长为 λ_c。当 $\lambda \le \lambda_c \mu m$ 时，吸收系数为 a_1；$\lambda > \lambda_c \mu m$ 时。吸收系数为 a_2。玻璃的折射率为 n_g。由于穿越半透明界面时，$n\lambda$ 为常数，对于 $n=1$ 的介质其等效间断点对应的波长为 $n_g\lambda_c$（由方程 11.3-84 可得）。此种情况下，用户应设定两个波带（极值），分别为 $0 \rightarrow n_g\lambda_g$ 和 $100 \rightarrow n_g\lambda_g$。这里，为了确保整个辐射光谱处于波带之内，上界波长已设定为较大的数值 100。当存在多种介质时，用户应该将所有的间断点波长转化为介质 $n=1$ 中对应的波长，并确定相应的波长界限。波带可以具有不同的宽度并且不必是连续的。用户可通过设定 $\lambda_{\min} = 0, n\lambda_{\max}T_{\min} \ge 50{,}000$ 以使得整个光谱被包含在波带之内。其中，$\lambda_{\min},\lambda_{\max}$ 为用户设定波长的最小/大值，$T_{\min}$ 为

计算域内介质的大概温度。

11.3.15 辐射介质属性定义

在 FLUENT 中，当使用 P-1，DO，或是 Rosseland 辐射模型时，用户应在 **Materials** panel. 面板中设定流体的吸收与散射系数。若使用 DO 模型模拟半透明介质，用户应为半透明流体和固体介质设定折射率。对于 DTRM 模型，用户仅需要定义吸收系数。

Define →Materials...

若计算模型中包含有诸如燃烧产物的气相组分，那么，气体的辐射吸收和/和散射可能比较重要。若流体中包含对散射有较大影响的分散相颗粒和液滴，那么，缺省设定为 0 的散射系数应该增大。对 CO_2 和 H_2O 混合物，FLUENT 可用 WSGGM 方法由其组分来确定总的吸收系数。11.3.8 节介绍了关于计算可变吸收系数的方法。7.6 节详细介绍了关于辐射属性的设定步骤。

非灰 DO 模型的吸收系数

若用户使用非灰体 DO 模型，那么，可以对灰带模型中的每个波带设定不同的常吸收系数（请参阅 7.6 节）。但是，用户不能在每个波带内计算组分依赖的吸收系数。如果用户使用 WSGGM 模型计算可变吸收系数，那么，对于所有波长，此数值完全相同。

11.3.16 辐射边界条件设定

当用户设定包含有辐射的具体问题时，应在壁面、入口和出口设定另外的边界条件。

Define →Boundary Conditions...

入口和出口边界条件

发射率

当用户激活辐射模型时，在相应的入（出）口边界条件设定面板（**Pressure Inlet** panel, **Velocity Inlet** panel, **Pressure Outlet** panel 等），用户可以设定其发射率。在 **Internal Emissivity** 选项下输入相应的数值即可。对于任何边界，缺省的发射率为 1。

对于非灰体的 DO 模型，设定的常发射率应用于所有的波带。

!! Rosseland 辐射模型不能使用 **Internal Emissivity** 边界条件。

黑体温度

FLUENT 包含一个选项，允许用户考虑气体和远离入（出）口的壁面温度的影响，并且可以在入（出）口为辐射和对流设定不同的温度边界条件。当计算域外的温度与计算域的温度相差很大时，这个选项是很有用的。例如，若远离入口的壁面温度为 2000K 而入口温度为 1000K，用户可以为辐射换热设定入口温度为壁面外温度，同时，设定入口的温度为实际温度以计算对流换热。由此，用户可将（入口）黑体辐射温度设定为 2000K

尽管此选项适用于冷壁与热壁，在冷壁面的时候，用户需多加小心。因为经由入（出）口的辐射远大于经由壁面向外的辐射。例如，如果外壁温度为 250K，入口温度为 1500K，那么，把入口辐射温度边界条件设定为 250K 是不恰当的。这个（入口）温度值应该在 250K～1500K 之间；多数情况下，其数值接近于 1500K（考虑到实际工业炉的状况，其具体数值依赖于外避免的几何结构以及入口附近气体的阿光学深度）。

立冬入（出）口面板中（**Pressure Inlet** panel, **Velocity Inlet** panel 等），在 **External Black Body Temperature Method** 下拉列表框中选定 **Specified External Temperature** 选项，然后输入辐射温度边界值作为 **Black Body Temperature**（入口黑体温度）。

!!若用户希望对辐射和对流应用相同的温度边界值，那么，保留 **Boundary Temperature** 缺省的设定值为 **External Black Body Temperature Method**.即可。

!!Rosseland 模型中，**Black Body Temperature** 边界条件不能使用。

DTRM、P-1、S2S 和 Rosseland 辐射模型的壁面边界条件

DTRM、P-1、S2S 和 Rosseland 辐射模型假定所有的壁面均为漫灰表面。在 **Wall** panel 面板中，唯一需要设定的辐射选项是壁面发射率。对于 Rosseland 模型，内部发射率为 1。对于 DTRM、P-1、S2S 模型，用户可以 **Wall** 面板中的 **Radiation** 选项下的 **Internal Emissivity** 文本框中输入相应的数值。缺省值为 1。

DO 模型的壁面边界条件

在使用 DO 模型时，用户可以模拟漫射、镜面反射以及半透明壁面（请参阅 11.3.6 节）。

对于很多工业领域，由于在多数情况下，壁面的表面粗糙度使得入射辐射发生漫反射，因此，用户可以使用漫射壁面来设定壁面的边界条件。对于高度抛光表面，例如反射装置和镜子，使用镜面边界条件时合适的。半透明边界条件适合于诸如飞机上的玻璃窗的模拟。

DO 模型的漫射壁面边界条件

Wall panel 面板的 **Radiation** 属性框中，如果在 **BC Type** 下拉列表框中选定了 **diffuse** 选项，将壁面就被设定为漫射表面。若使用了灰体辐射模型，壁面就是漫灰表面；若使用了非灰体 DO 模型，壁面就是非灰体漫射表面。一旦在 **BC Type** 中选定了 **diffuse** 类型，在 **Wall** panel 面板中只需要设定的辐射边界条件就是发射率。

对于灰体辐射 DO 模型，在 **Internal Emissivity** 文本框中输入相应的数值（缺省值为 1）。对于非灰体 DO 模型，可以对每个波带设定常发射率（每个波带内的缺省发射率为 1）。

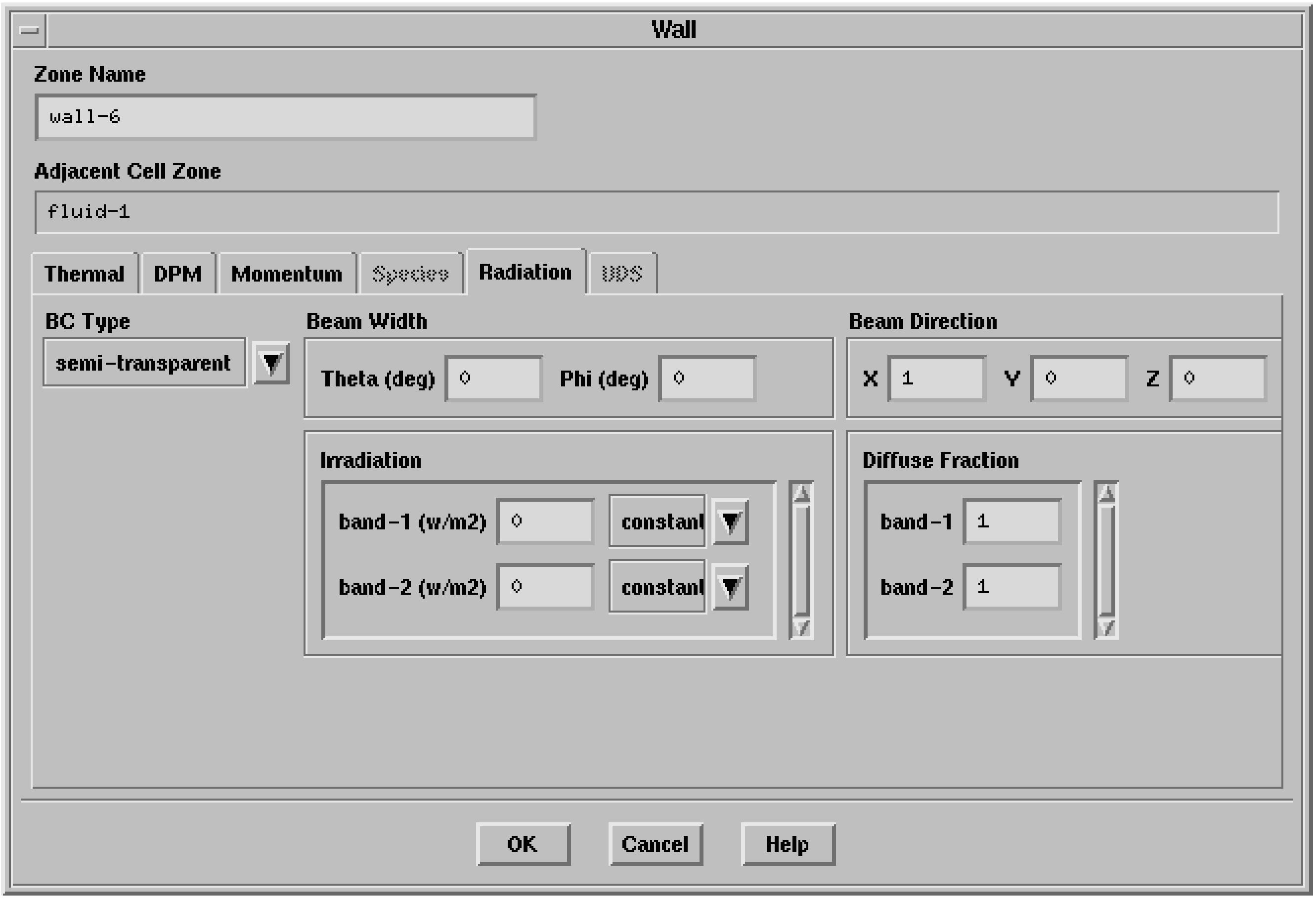
DO 模型的镜面边界条件

Wall panel,面板中的 **Radiation** 属性框中，在 **BC Type** 下拉列表中选定 **specular** 将设定一个镜面（反射）壁面。此设定将不需要其它的任何输入项。

DO 模型的半透明边界条件

Wall panel 面板中的 **Radiation** 属性框中，在 **BC Type** 下拉列表中选定 **semi-transparent** 将设定一个半透明壁面

对于外部半透明壁面，用户可在 **Wall** 面板（图 11.3.15）中设定外部辐射热流（指向计算域内的）。对于内部半透明壁面，请参见下面的关于多计算区域的讨论。



图表 17 半透明壁面的壁面设定面板

外部半透明壁面的输入设定如下：

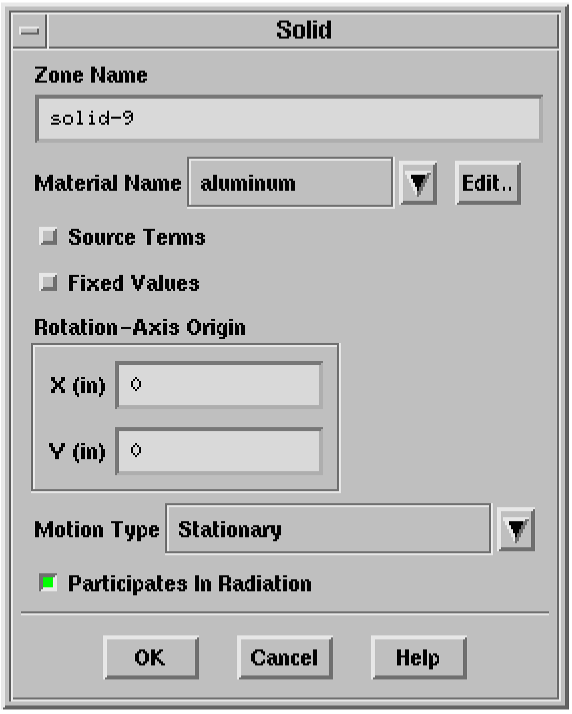
1. 在 **Irradiation** 下输入向内的辐射热流数值。若使用非灰体 DO 模型，可对每个波带给定不变的辐射热流数值。.
2. 通过设定辐射射线的经纬度角（**Theta** and **Phi**）来设定射线宽度（the **Beam Width**）。
3. 输入确定射线方向的(**X,Y,Z**)向量。
4. 设定向内辐射热流的漫反射分数。缺省情况下，漫反射分数（**Diffuse Fraction**）为 1，表明所有的向内辐射全部都是漫反射。若用户将此数值设定为小于 1，那么，漫射部分将发生漫反射（如 11.3.6 节所述），投射部分也就爱你跟发生漫反射，而剩余的部分将保持为镜面反射。

!! 需要注意的是，外部介质的折射率假定为 1。

!! 若在 **Wall** 面板中的选型下 **Thermal** 的 **Heat Flux** 仅设定了热流，那么，设定的热流被视为边界热流中的对流和热传导的总和。向内辐射热流设定了外部区域流向内部计算区域的辐射热流，而内部区域向外的辐射热流将由 FLUENT 计算得来。

在指定得计算单元区域激活辐射计算（仅适用于 DO 模型）

DO 模型中，用户可以在计算域内的任何指定计算单元区（不）进行辐射计算。缺省情况下，在所有流体区域都将求解 DO 辐射方程，但在固体区并不进行计算。若用户想模拟半透明介质，可由在固体区激活辐射计算。为此，可在 **Solid** panel 面板（图 11.3.16）中激活 **Participates In Radiation** 选项。



图表 18 固体区设定面板

!! 一般而言，用户不应在任何流体区域将 **Participates In Radiation** 选项禁止。

DO 模型中多计算区域的双面壁面的边界条件设定

对于 DO 模型，用户可以对双面壁面的每一个表面设定为漫射或镜面反射（**diffuse** or **specular**）边界条件。需要注意的是，形成此双面壁面的两个流体区域在辐射计算上不能是耦合的（即一个区域的辐射变量不能依赖于另一个区域的任何可变特征量。尽管用户可以将两个区域设定为换热耦合）。

用户可以对两个临近流体区或固体区之间的双面壁面设定为 **semi-transparent**（半透明介质）以实现辐射的耦合计算。此时，辐射热流将穿越此壁面。只有在壁面两边的计算单元均参与辐射换热，用户才可将此壁面设定为半透明介质；若已设定了壁面的一边为半透明，那么，另一面也必须设定为半透明。但用户可以在两个边设定不同的漫射分数。

也可以为双面壁面设定厚度。此时，当辐射穿越壁面时，就可以考虑墙壁厚度引起的折射。用户可以在 **Wall** panel 面板（6.13.1 节）中为此壁面设定 **Wall Thickness** 和 **Material Name**。壁面折射率和吸收系数将是设定的壁面介质相应值。对于固体介质仅可以设定常吸收系数。计算壁面有效折射率和投射时假定壁面为具有设定厚的平面壁面，且只有吸收没有发射。周围介质的折射率对应着周围流体的折射率（当外部壁面设定为半透明时，外部介质的折射率假定为 1）。

热边界条件

一般而言，当激活任一种辐射模型时，任何适定的混合热边界条件都可以使用。对于等温壁面、导热壁面或者是设定了外部热流边界的壁面（6.13.1 节），辐射模型都是适定的。对于在壁面定义了热流边界条件问题，任一种辐射模型都可以使用，此时，设定的热流被视为对流与辐射热流之和。但例外的情况是在 DO 模型中的半透明壁面，此时，FLUENT 允许用户对副社会和对路设定各自的热流（如上文所述）。同时，对于半透明壁面，不允许设定等温壁面。

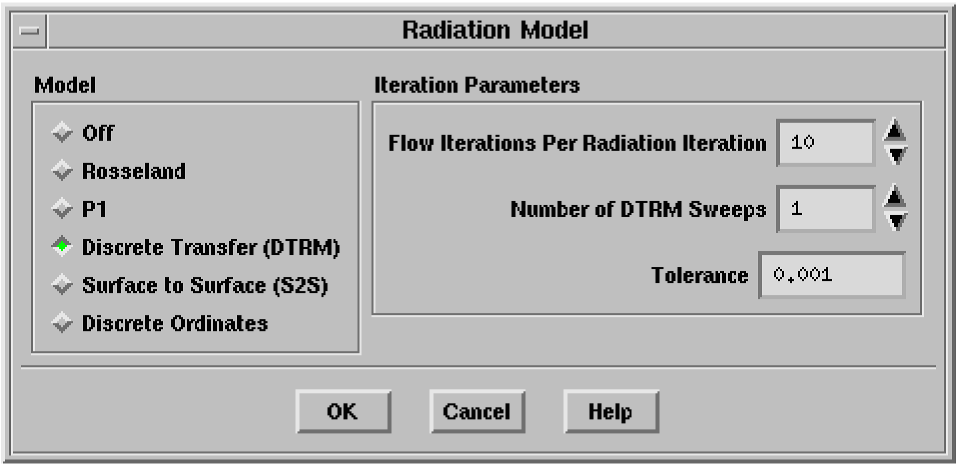
11.3.17 辐射求解参数设定

对于 DTRM、DO、S2S 和 P-1 辐射模型，有一些参数控制着辐射计算。对于多数问题，可

由使用缺省的求解参数,,但用户可以修改这些参数以获得更好的收敛结果和计算精度。对于 Rosseland 模型，由于它仅通过能量方程来影响计算结果，所以没有需要设定的求解参数。

DTRM 求解参数

激活 DTRM 模型后，FLUENT 在计算过程中更新辐射场，并且由射线跟踪方法计算能量源相和热流（11.3.3 节）。FLUENT 中有几种参数可控制方程的求解和计算精度。这些参数出现在 **Radiation Model** panel 面板（图 11.3.17）中的扩展部分。



图表 19 辐射模型面板（DTRM）

用户可以更改 **Number of DTRM Sweeps** 选项以控制全局迭代过程中辐射计算的最大更新次数。缺省的辐射更新次数为 1，这表明辐射强度仅更新一次。若用户增加此数值，表面辐射强度将更新多次，直到达到收敛标准或者超过了设定的辐射更新次数。

Tolerance（误差参数，缺省情况为 0.01）确定了何时辐射强度的迭代达到了收敛标准。误差参数定义为相邻两次 DTRM 的表面辐射强度迭代差值的模（方程 11.3-85)。

用户也可以控制辐射场在连续相迭代进行时的迭自身代频率。**Flow Iterations Per Radiation Iteration**（）缺省情况下，为 10 次。这表示流场每迭代十次辐射场迭代一次。加大次数值可能会加速即萨过程，但整个向量场的收敛可能会减慢。

S2S 求解参数

对于 S2S 模型，用户可以象使用 DTRM 模型一样来控制连续相迭代时的辐射场的迭代频率。轻参阅上面的关于 DTRM 模型的 **Flow Iterations Per Radiation Iteration** 介绍。

若用户使用分离式求解器，并且在计算开始屏蔽掉了能量方程的计算，那么，应该将 **Flow Iterations Per Radiation Iteration** 从 10 减小到 1 或 2。这能够保证辐射计算的收敛。若此种情况下仍然保持缺省的参数，那么，可能在辐射计算达到收敛之前，流动和能量方程就已经达到收敛而计算被终止。关于 S2S 模型的计算残差请参阅 11.3.18 节。

用户可以通过更改 **Number of S2S Sweeps** 来控制辐射计算在全局迭代时的扫描次数。缺省的扫描次数为 1，表明辐射计算仅被更新一次。若增加此数值，那么，表面辐射将更新数次，直到辐射残差达到收敛标准或者是达到了设定的最大扫描次数。

Tolerance（误差参数，缺省情况为 0.01）确定了何时辐射强度的迭代达到了收敛标准。误差参数定义为相邻两次 S2S 的表面辐射强度迭代差值的模（方程 11.3-86)。

DO 求解参数

对于 DO 模型，用户可以象使用 DTRM 模型一样来控制连续相迭代时的辐射场的迭代频率。请参阅上面的关于 DTRM 模型的 **Flow Iterations Per Radiation Iteration** 介绍。

对于多数问题，缺省的亚松弛系数 0.1 是足够的。对于光学深度较大（$\alpha L > 10$）的问题，

用户可能会遇到收敛较慢或解发生振荡。此种情况下，对能量方程和 DO 方程进行亚松弛处理是有效的。对所有的方程推荐使用的亚松弛系数为 0.9～1.0。

P-1 求解参数

对于 P-1 模型，用户可控制收敛标准和亚松弛系数。同时，应该留意上面所述的光学深度的问题。

P-1 模型缺省的收敛标准为 10^{-6}，由于此项残差与能量方程的残差紧密关联，其收敛标准与能量方程相同。关于收敛标准的细节请参阅 22.16.1 节。用户可以在 **Residual Monitors** panel 面板中为 **p1** 设定 **Convergence Criterion** 收敛标准。

Solve →Monitors →Residual...

P-1 模型的松弛因子的设定与其他变量相同，请参阅 22.9 节。需要注意的是由于辐射温度方程（方程 11.3-12）是相对稳定的标量输运方程，多数情况下，用户可以设定较大的松弛系数（0.9～1.0）。

P-1 辐射模型要获得最佳的收敛效果，其光学厚度 $(a+\sigma_s)L$ 必须为 0.01～10（最好不大于 5）。对于较小的几何结构（特征尺寸为 1cm），其光学厚度一般都很小。但针对此类问题，用户可以加大吸收系数以使得 $(a+\sigma_s)L$。加大吸收系数的数值并不会改变问题的物理本质，这是因为对于光学厚度＝0.01 和光学厚度<0.01 的问题，吸收系数对计算精度的影响很小。

11.3.18 求解

一旦辐射问题设定好之后，用户可以按通常的方法求解方程。需要注意的是，P-1 和 DO 辐射模型求解附加的方程并输出其计算残差；DTRM、Rosseland 和 S2S 辐射模型不计算附加的方程（因为辐射是通过能量方程而影响到计算结果）。DTRM 和 S2S 模型每进行一次迭代计算，FLUENT 将输出计算残差信息。请参阅下面的介绍。

P-1 模型的残差输出

P-1 模型每进行一次辐射迭代计算，其计算残差将同其他变量一同被输出。FLUENT 中 P-1 辐射模型的残差定义和其他变量的定义相同（参阅 22.16.1 节）。

DO 模型的残差输出

每进行一轮 DO 迭代计算，对于所有的 DO 输运方程，DO 模型输出相应的残差模。辐射模型的残差定义和其他变量的定义相同（参阅 22.16.1 节）。

DTRM 模型的残差输出

在一般的残差输出信息中并不包括 DTRM 残差。辐射对计算结果的影响是通过能量方程及其计算残差而表现出来的。但是，每进行一次 DTRM 辐射迭代时，FLUENT 将打印输出（于控制台窗口）每轮 DTRM 迭代的正则化残差。正则化残差的定义为：

$$E=\frac{\sum_{all-radiating-surfaces}\left(I_{new}-I_{old}\right)}{N\left(\sigma T^4/\pi\right)} \qquad (11.3.85)$$

其中，残差 E 为当前迭代轮次的辐射强度（I）的最大改变值经由最大表面发射能力进行正则化，N 为辐射表面的总数目。需要注意的是，缺省的辐射计算达到收敛标准（11.3.17 节）被定义为 E 下降到 10^{-3} 或更低。

S2S 模型的残差输出

在一般的残差输出信息中并不包括 S2S 残差。辐射对计算结果的影响是通过能量方程及其计算残差而表现出来的。但是，每进行一次 S2S 辐射迭代时，FLUENT 将打印输出（于控

制台窗口）每轮 S2S 迭代的正则化残差。正则化残差的定义为：

$$E = \frac{\sum_{all-radiating-surface-clusters}\left(J_{new} - J_{old}\right)}{N\sigma T^4} \qquad (11.3.86)$$

其中，残差 E 为当前迭代轮次的有效辐射（辐射度、辐射通量密度、辐射功率密度）的最大改变值经由最大表面发射能力进行正则化，N 为辐射表面束的总数目。需要注意的是，缺省的辐射计算达到收敛标准（11.3.17 节）被定义为 E 下降到 10^{-3} 或更低。

屏蔽掉辐射热流的更新

有时，用户可能希望设定模型时把辐射考虑进来，然后在初始计算过程中屏蔽掉辐射计算。对于 P-1 和 DO 辐射模型，用户可以通过在 **Solution Controls** panel 面板的 **Equations** 列表中暂时弃选 **P1** 或 **Discrete Ordinates** 即可。对于 DTRM 和 S2S 模型，方程列表中没有附加项。用户可以在 **Radiation Model** panel.面板的扩展部分设定一个非常大的 **Flow Iterations Per Radiation Iteration**（辐射迭代计算频率）。

若用户屏蔽了辐射计算，FLUENT 将在随后的迭代中跳过辐射的计算更新，但当前辐射通过辐射的吸收、壁面热流等因素将会对随后的计算造成影响。以此种方法评比掉辐射计算可以用来初始化流场或者是在辐射计算相对容易收敛的情况下，把主要精力集中于其它方程的计算。

11.3.19 辐射变量的输出与显示

当用户模型中包含有辐射传热时，FLUENT 提供了几个附加的输出项目。用户可以以文本或图形方式输出下列的各个变量 / 函数：

- **Absorption Coefficient**（吸收系数，仅适用于 DTRM、DO、 P -1、Rosseland 模型）
- 散射系数（**Scattering Coefficient** ，仅适用于 P -1、DO、Rosseland 模型）
- 折射率（**Refractive Index**，仅适用于 DO 模型）
- 辐射温度（**Radiation Temperature**，仅适用于 P-1、DO 模型）
- 入射辐射（**Incident Radiation**，仅适用于 P-1、DO 模型）
- 入射辐射（某个波带 n）（**Incident Radiation (Band n)**，仅适用于非灰体 DO 模型）
- 表面束标识号（**Surface Cluster ID** ，仅适用于 S2S 模型）
- 辐射热流（**Radiation Heat Flux**）

前七个变量包含在后处理面板中的变量选择下拉列表框中的 **Radiation...**目录下，追呼一个变量包含在 **Wall Fluxes...**目录下。关于这些变量的定义请参阅第 27 章。

!! 注意辐射热流的符号约定为：离开壁面的热流为正。

注意，用户可以将某些壁面区域的热流数据输出到文件中以备审视和用于外部程序。细节请参阅 11.2.5 节。

通过边界的辐射热流数据的输出

用户可以使用 **Flux Reports** panel 面板来计算通过计算域的每个边界的辐射传热量，或者是对通过这些边界的辐射传热量求和。

Report →Fluxes...

关于生成热流输出数据的袭击诶请参阅 26.2 节。

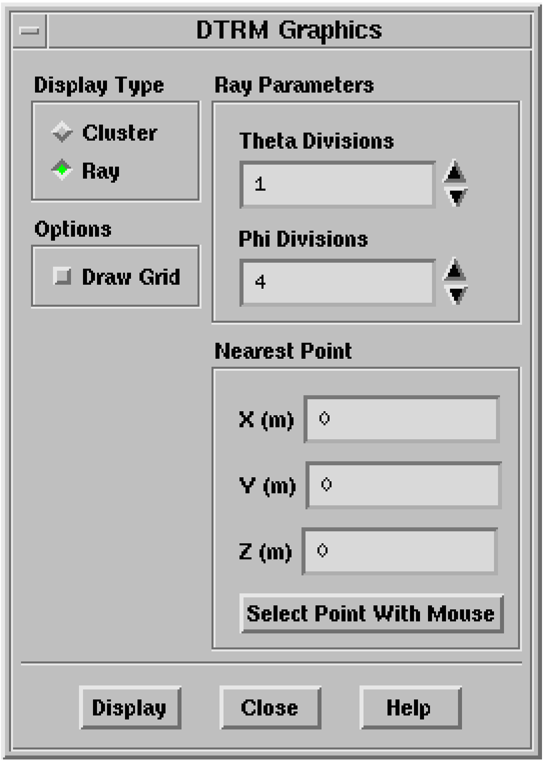
使用 DTRM 模型时的全局热量平衡

DTRM 模型中的全局热量平衡或辐射热流平衡受到（跟踪）射线数目的限制。因此，对于某个给定的计算工况，若射线数目不够多，用户可能会发现辐射热流并不严格守恒。这种不平衡是由于对射线的离散化处理所带来的必然后果。可以通过增加壁面的射线数目来改善这种不平衡。

11.3.20 DTRM 中的射线（束）的显示

当用户使用 DTRM 模型时，在射线从某个表面束发出时，FLUENT 允许用户显示表面束和辐射体。用户应使用 **DTRM Graphics** panel 面板（图 11.3.18）来进行所有的相关显示。

Display →DTRM Graphics...



图表 20 DTRM 图形显示面板

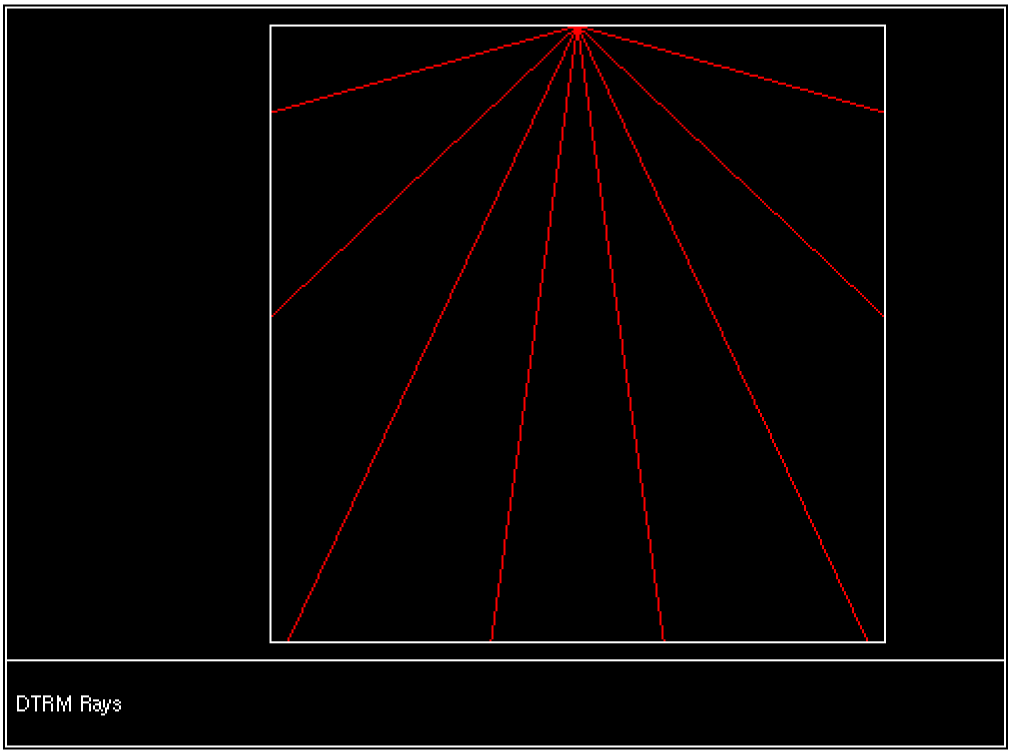
显示表面束（辐射体）

要显示出射线束，在 **Display Type** 选项下选定 **Cluster** 选项，然后在 **Cluster Type** 下选择 **Surface** 或 **Volume**。若要显示出所有的表面束或辐射体，在 **Cluster Selection** 选项下选定 **Display All Clusters**，然后点击 **Display** 按钮。

若仅显示离某个点最近的射线束（表面束或辐射体），不要选择 **Display All Clusters** 选项，在 **Nearest Point** 下输入坐标。用户也可以用鼠标选择最近的点。点击 **Select Point With Mouse** 按钮，然后在图形窗口的某点单击右键。

显示射线

若要显示出从最接近某点的表面束发出的射线，可在 **Display Type** 选项下选定 **Ray**。在 **Ray Parameters** 下为 **Theta** 和 **Phi Divisions** 设定好相应的数值（请参阅 11.3.11 节），然后点击 **Display** 按钮。图 11.3.19 显示了一个简单 2 D 几何体的射线。



图表 21　射线显示

图形显示中包含网格

对于某些问题，尤其是复杂的 3 D 模型，用户可能希望在显示射线（束）的同时也显示出网格以作为空间参考。例如，用户可能希望在显示射线的同时也显示出入口和出口的位置。这可以通过在 **DTRM Graphics** 面板中激活 **Draw Grid** 选项来完成。当用户激活 **Draw Grid** 选项时，**Grid Display** panel 面板自动弹出以让用户设定网格显示参数。当用户在 **DTRM Graphics** 面板中点击 **Display** 按钮时，那么，在 **Grid Display** 面板中已设定的显示网格将与射线（束）同时显示出来。

11.4 周期性传热问题

FLUENT 可以模拟具有周期性对称条件的几何体的传热，例如对列管式换热器，只需要模拟单个模块即可。

本节讨论具有顺压（）周期性对称条件的传热。顺压周期性对称体的流动问题在 8.3 节讨论，无压降周期性对称体的流动问题在 6.15 节介绍。

- 11.4.1 Overview and Limitations 概述与适用范围
- 11.4.2 Theory 理论
- 11.4.3 Modeling Periodic Heat Transfer 周期性传热问题的模拟
- 11.4.4 Solution Strategies for Periodic Heat Transfer 周期性传热问题求解策略
- 11.4.5 Monitoring Convergence 监视收敛
- 11.4.6 Postprocessing for Periodic Heat Transfer 周期性传热问题的后处理

11.4.1 概述与适用范围

概述

正如 8.3.1 节所讨论的，当流动经过长度 L 而发生重复现象，并且在这 L 长度的重复模块时压降保持为常数。这种流动就称为顺压周期流动。

当具有常壁温或常热流边界条件的，该问题可视为周期对称传热。此类问题中，计算域的温度（有某种方式缩放后）呈现周期性变化[173]。正如周期性流动的处理方法，此类问题在数值计算上可以仅计算单一模块或一个周期长度。

周期性传热的计算限制

除了 8.3.1 节讨论的顺压流动中的各种限制，在计算周期性传热问题时，还具有下面的各种限制：

- 必须使用分离式求解器
- 必须使用确定的热流或常壁温边界条件。另外，对于某些问题，热边界的类型不能混合使用：所有的边界要么是常壁温，要么都是热流（但是，用户可以在问题中设定常壁温与绝热壁面）。对于常壁温情况，所有的壁面温度要相等（即不能设定壁面温度分布）或者是绝热。对于热流情况，在不同的壁面可以设定不同的热流值（同一壁面可设定热流分布。
- 存在固体区域的时候，固体区不能与周期性对称面相交。
- 流体的热力学与输运属性（比热、导热率、粘度、密度）不能设定为温度的函数（因此不能模拟化学反应流动）。但是，输运属性可以在空间上周期性变化，这样，用户可以模拟周期性湍流，在这个流动中，湍流有效输运属性（有效导热率、有效粘度）在周期性的湍流流动区域上变化。

关于周期性传热问题的设定输入项的详细介绍，请参阅 11.4.2。、11.4.3 节。

11.4.2 理论

顺压、具有常壁温边界的周期性流动 FLUENT 能够处理的两类周期性传热问题之一。当设定热流边界时，也可以计算得到周期性的温度场。此种情况下，两个周期边界间的温度变化量为常数，因此可由下述的方法得到计算域内的静输入热流。

!! 只有使用分离式求解器才可以计算周期性传热问题。

常壁温的周期性温度条件定义

对于常壁温周期性流动，当流体流过差区域时，其温度将逐步接近于壁面温度。但是，可以使用一个缩放后的温度（类似于无量纲导热方程中的过余温度），使其变化呈现周期性变化。对于常壁温，呈现周期性流动的缩放后温度为[173]:

$$\theta = \frac{T(\vec{r}) - T_{wall}}{T_{bulk,inlet} - T_{wall}} \qquad (11.4.1)$$

表观温度 $T_{bulk,inlet}$ 的定义为：

$$T_{bulk,inlet} = \frac{\int_A T\left|\rho\vec{v} \bullet d\vec{A}\right|}{\int_A \left|\rho\vec{v} \bullet d\vec{A}\right|} \qquad (11.4.2)$$

上式的积分为入口周期边界（A）。正是缩放后的温度 θ，在长度为 L 的区域服从周期性的边界条件。

热流边界的周期性温度的定义

对于具有热流边界的周期性传热问题，未进行缩放的温度场的形式余周期性流动中的压力场的形式相似：

$$\frac{T(\vec{r}+\vec{L}) - T(\vec{r})}{L} = \frac{T(\vec{r}+2\vec{L}) - T(\vec{r}+\vec{L})}{L} = \sigma \qquad (11.4.3)$$

其中，$\vec{L}$ 为计算域的周期性长度向量。温度梯度 σ 可用区域得到的总热量 Q 的形式写为：

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m}c_p L} = \frac{T_{bulk,exit} - T_{bulk,inlet}}{L} \qquad (11.4.4)$$

其中 $\dot{m}$ 为设定的或用过计算得到的质量流率。

11.4.3 周期性传热问题的模拟

顺压流动概述以及传热模拟过程

顺压流动余周期性传热问题的通常求解可分成两部分。首先，不考虑温度变化得情况下求得周期性得速度场分布；然后，令速度场不变计算温度场。这种周期性流动计算可由下面几步完成：

1. 建立具有可平移（即非旋转周期性对称面）周期性边界条件得网格。
2. 给定常热力学和分子输运属性。
3. 设定通过周期性边界得周期性压力梯度和净质量流率。
4. 计算周期性流动流场，求解动量、连续以及（可选的）湍动能方程。
5. 在壁面设定热流或常壁温的热边界条件。
6. 设定入口平均温度。
7. 求解能量方程（仅此一项）以预报周期性温度场。

下面详细阐述这些步骤。

周期性传热的用户输入项

为了模拟周期性传热问题，用户需要设定相应的模型（按照 8.3.3 节的方法），并使用分离式求解器。要注意 8.3.1、11.4.1 节所提到的种种限制。另外，用户还必须为周期性传热问题给定下面的输入项：

1. 在 **Energy** panel 面板中激活能量方程的求解

   Define → Models → Energy...

2. 通过如下的步骤设定热边界条件：

   Define → Boundary Conditions..

- 若周期性传热模型中需要对壁面设定温度边界条件，那么，在 **Wall** panels 面板中，可对相应的壁面设定壁温 T_{wall}。
- 若周期性传热模型中需要对壁面设定热流边界条件，那么，在 **Wall** panels 面板中，可对相应的壁面设定热流。对于不同的壁面，用户可以设定不同的热流值，但在此计算域中不能再有其它类型的热边界条件，

3. 如果需要，设定固体区，可按照如下的步骤：

Define →Boundary Conditions...

- 若周期性传热模型中的热边界条件为温度边界，那么，只要固体区被具有温度边界的计算域边界完全包围，计算域内可以包含固体导热区，但在这种情况下，不允许在固体区内包含热源。
- 若周期性传热模型中的热边界条件为热流边界，那么，用户可在计算域的任何区域设定固体导热区，如果需要的话，此导热区可以包含体积热源。

4. 使用 **Materials** panel 面板设定介质（常）属性（密度、比热、粘度、导热率），不允许设定依赖于温度的属性。

Define →Materials...

5. 在 **Periodicity Conditions** panel 面板中设定上游平均温度。

Define →Periodic Conditions...

!! 若周期性传热模型中的热边界条件为温度边界，那么，体积平均温度不应等于壁面温度，这样的话，计算域内的温度将处处相等（计算中将出现小量）。

11.4.4 周期性传热问题求解策略

在按照 11.4.3 节所述方法设定完输入项之后，用户就可以求解流动域传热问题了。求解此类问题最有效地方法是先求解流动（没有传热），然后在此基础上，固定流动问题的解，单独求解传热。这种顺序求解方法的步骤如下：

1. 在 **Solution Controls** panel 面板中的 **Equations** 选项下屏蔽掉能量方程的求解。

Solve →Controls →Solution...

2. 求解剩下的方程（连续、动量、或者还有湍动能方程），获得周期性问题的（流动）收敛解。
   !! 在开始计算前的初始化流场的温度时，应将其设定为入口体积平均温度与壁面温度的平均值。
3. 回到 **Solution Controls** panel 面板中，激活能量方程求解选项而将流动方程求解屏蔽掉。
4. 求解能量方程得到周期性传热问题的温度场。

在求解周期性流动与传热问题时，若即考虑流动又考虑传热，用户会发现上述的方法更加有效。

11.4.5 监视收敛

若周期性传热模型中的热边界条件为温度边界，用户可以监视体积平均温度的比值：

$$\theta = \frac{T_{wall} - T_{bulk,inlet}}{T_{wall} - T_{bulk,exit}} \qquad (11.4.5)$$

计算过程中，应使用 **Statistic Monitors** panel 面板来确保获得收敛解。可选择

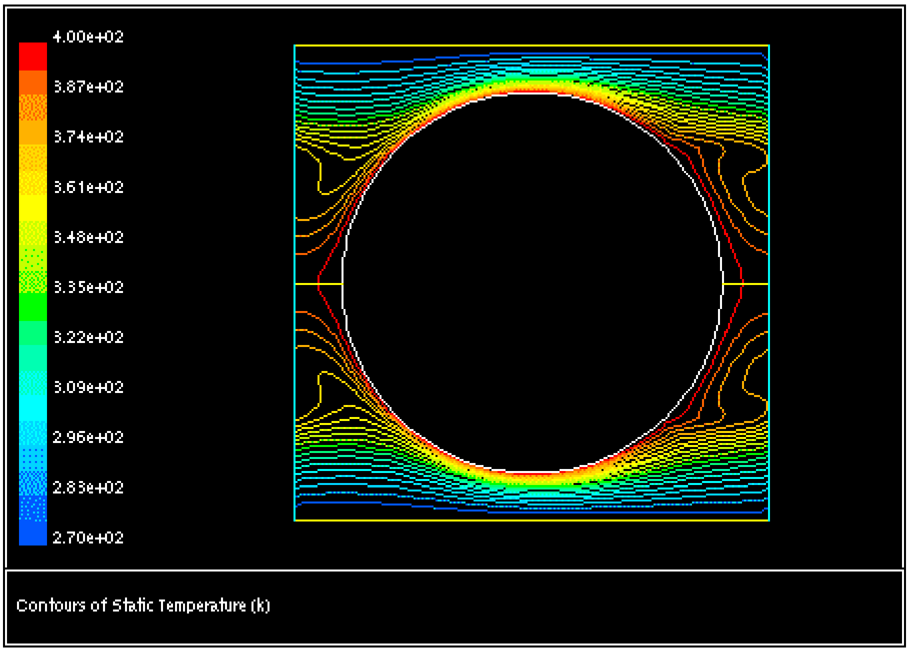
per/bulk-temp-ratio 作为监视变量。细节请参阅 22.16.2 节。

11.4.6 周期性传热问题的后处理

在周期性计算模型中，由 FLUENT 计算得到的实际温度场并非呈现周期性，因此，在后处理中，显示的将是实际温度（方程 11.4-1 中的 $T(\vec{r})$ ）。显示出来的温度可能超出由入口体积平均温度和壁温定义的温度值范围。由于入口周期面的温度分布，能会出现温度大于其平均温度的数值。

在后处理面板中的变量选择下拉列表中的 **Temperature...(**温度项)下，可以选择 **Static Temperature**。

图 11.4.1 为某个具有周期性几何条件的换热器温度场。



图表 22 常壁温 2D 换热器的温度场

11.5 浮力驱动流动

当流体受热并且其密度随温度而变化时，那么，密度变化引起的重力差异将会引发流体的流动。FLUENT 可以模拟这种被称作自然对流（或混合对流）的浮力驱动流动

- 11.5.1 Theory 理论
- 11.5.2 Modeling Natural Convection in a Closed Domain 封闭区域内自然对流的模拟
- 11.5.3 The Boussinesq Model Boussinesq 模型（假设）
- 11.5.4 User Inputs for Buoyancy-Driven Flows 浮力驱动流动的用户输入项
- 11.5.5 Solution Strategies for Buoyancy-Driven Flows 浮力驱动流动的求解策略
- 11.5.6 Postprocessing for Buoyancy-Driven Flows 浮力驱动流动的后处理

11.5.1 理论

混合对流中，浮力的影响可通过格拉晓夫数与雷诺数之比来判别：

$$\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2}=\frac{\Delta\rho gh}{\rho v^2} \qquad (11.5.1)$$

当此数值接近或超过 1.0 时，浮力对流动将有较大影响。相反，若此数较小，浮力的影响可以不予考虑。在纯粹自然对流中，浮力引致的流动强度可瑞利数判定：

$$Ra=\frac{g\beta\Delta TL^3\rho}{\mu\alpha} \qquad (11.5.2)$$

其中，β 为热膨胀系数：

$$\beta=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p \qquad (11.5.3)$$

α 为热扩散率（导温系数）：

$$\alpha=\frac{k}{\rho c_p} \qquad (11.5.4)$$

若瑞利数大于 10^8，浮力驱动的对流为层流，向湍流转捩的瑞利数为 $10^8 < Ra < 10^{10}$。

11.5.2 封闭区域内自然对流的模拟

当模拟封闭区域内的自然对流时，计算结果将依赖于计算区域内的流体质量。除非密度已知，否则我们就不能确定流体质量，因此，用户必须要有如下的设定步骤：

- 按瞬态计算。这种处理方法中，初始密度由初始压力、温度计算得到，因此初始质量可认为是已知的。当求解沿时间推进时，（流体）质量保持守恒。在计算域内温差较大时，用户必须按瞬态计算。
- 使用 Boussinesq 模型（11.5.3 节）按稳态计算。这种处理方法中，用户需设定常密度，这样，质量也就被相应的阿确定了。只有在流体计算域内的温差较小时，此种方法才是有效的；如若不然，必须要按瞬态计算。

对于封闭区域，用户不能对不可压缩理想气体使用固定的操作压力（operating pressure）。可以对可压缩理想气体使用固定的操作压力，而不可压理想流体只能使用浮动操作压力（*floating* operating pressure）。关于浮动压力选项，请参阅 8.5.4 节。

11.5.3 Boussinesq 模型（假设）

对于多数自然对流问题，使用 Boussinesq 模型（假设）比使用依赖于温度变化而密度发生变化的模型获得更快的收敛速度。除了动量方程中的浮力项，这种模型在其它的需要求解的方程中把密度视为常数：

$$(\rho-\rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T-T_0)g \qquad (11.5.5)$$

其中，ρ_0 为流体的（常）密度，T_0 为操作（工作或环境）温度，β 为热膨胀系数。方程 11.5-5 是通过使用 **Boussinesq** 近似 $\rho=\rho_0(1-\beta\Delta T)$ 来消掉浮力项中的 ρ。只要流体密度变化很小，这种近似就是精确的。有其是在 $\beta(T-T_0)<<1$ 时，Boussinesq 近似是适用的。

Boussinesq 模型（假设）的适用范围

当流域内的温差较大时，Boussinesq 模型（假设）不再适用。另外，它也不能与组分计算同时使用。

11.5.4 浮力驱动流动的用户输入项

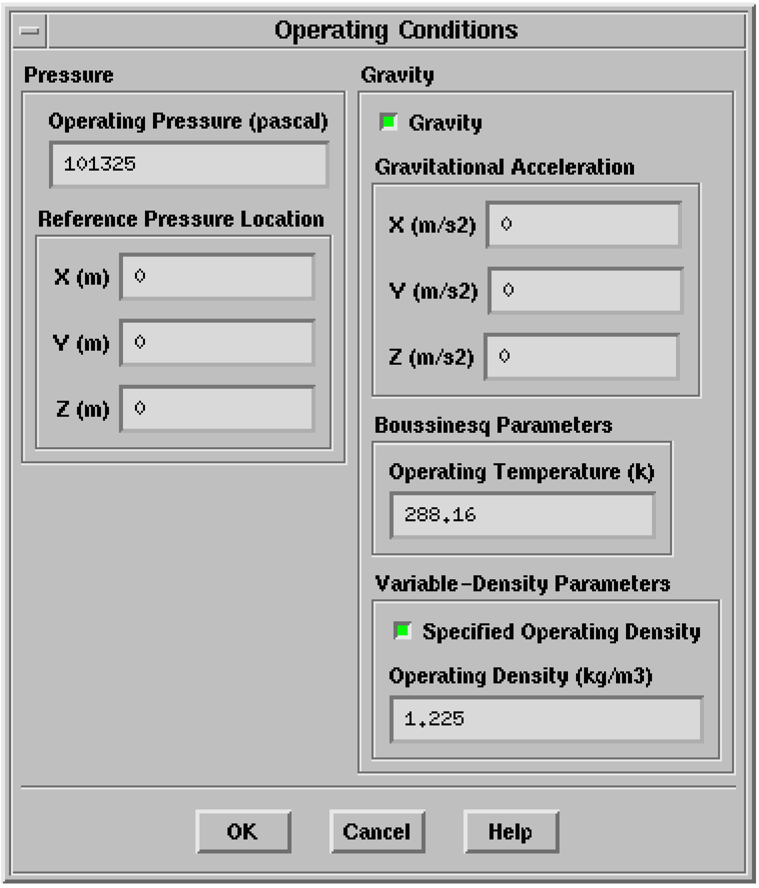
在模拟混合/自然对流中，用户必须提供如下的输入项才可考虑到浮力的影响：

1. 在 **Energy** panel.面板中，激活能量方程

   Define → Models → Energy...

2. 在面板（图 11.5.1）中激活选项，并在 the **X**, **Y**, 和 (3D) **Z** 文本框内输入数值以设定每个坐标方向的重力加速度（**Gravitational Acceleration**）。

   Define → Operating Conditions



图表 23 操作（工作、环境）条件面板

需要注意的是 FLUENT 缺省的重力加速度为 0。

3. 若使用不可压缩理想气体模型，在 **Operating Conditions** 面板中检查 **Operating Pressure** 选项以确定其设为某个接近的数值（非 0）。
4. 视用户是否使用了 Boussinesq 近似模型，设定下面的相应参数：
   - 若未使用 Boussinesq 近似模型，设定项如下：
     (a) 若需要，在 **Operating Conditions** 面板中激活 **Specified Operating Density** 选项，并设定 **Operating Density**。细节见下。
     (b) 把流体密度定义为温度的函数（7.1.3、7.2 节）。

     Define →**Materials...**

   - 若使用了 Boussinesq 近似模型（11.5.3 节），设定项如下：
     (a) 若需要，在 **Operating Conditions** 面板中设定 **Operating Temperature**。（方程 11.5-5 中的 T_0）
     (b) 在 **Materials panel**,面板中，选择 **boussinesq** 作为流体密度（**Density**）确定方法（7.1.3、7.2 节）。
     (c) 在 **Materials** 面板中，为流体介质设定 **Thermal Expansion Coefficient**（方程 11.5-5 中的 β）以及一个常密度。

需要注意的是，若用户模型涉及多种流体介质，可以选择是否对每种介质使用

Boussinesq 近似模型。这样，可能有些介质使用 Boussinesq 近似模型而其它介质未使用 Boussinesq 近似模型。此种情况，用户需要设定上述步骤所描述的所有参数。

5. 用户在压力入/出口（pressure inlet and outlet）设定的边界压力是方程 11.5-6 中的修正压力。一般而言，如果没有外部的强制压力梯度（边界条件），用户应在 FLUENT 中对入口和出口边界给定等效压力 p'。

   Define →Boundary Conditions...

6. 在 **Solution Controls** panel 面板中，选定 **Body Force Weighted** 或 **Second Order** 作为 **Pressure**（压力方程）的 **Discretization**（差分离散）方法。

   Solve →Controls →Solution...

   此时，用户可能就会希望在壁面附近增加网格数来求解流动边界层。
   若使用分离式求解器，对于 **Pressure**（压力方程)，也可以选择 **PRESTO!**格式作为方程的 **Discretization**（差分离散方法)。

关于传热计算的设定请参阅 11.2.2 节。

操作密度的定义

当不使用 Bossinesq 近似时，出现于动量方程中浮力项的操作密度 ρ_0 为 $(\rho-\rho_0)g$。

FLUENT 中由修正压力确定的浮力项为：

$$p_s' = p_s - \rho_0 gx \qquad (11.5.6)$$

这样，静止流体的水力学压力为：

$$p_s' = 0 \qquad (11.5.7)$$

因此，对于所有的浮力驱动流。操作压力的设定是很重要的。

操作密度的设定

缺省情况下，FLUENT 通过对所有计算单元取平均得到操作密度。某些时候，相比于让程序计算，用户自己显式声明操作密度能获得更好的结果。例如，对于具有压力边界条件的自然对流问题，理解到用户设定的压力是方程 11.5-6 中的 p_s' 这一点（而非 p_s）是很重要的。

尽管用户可能知道实际压力 p_s，但为了由 p_s 得到 p_s'，用户还需要知道操作密度 ρ_0。因此，用户应该显式声明操作密度而不是使用计算平均值。然而，设定值应当接近平均值。

在某些时候，设定的操作密度只能提高计算的收敛性，而对真实物理过程的模拟改进甚少。针对这种情况，可以使用表观密度作为操作密度。但要确保所选定的密度值与计算域内的特征温度相一致（即介质密度应与其特征温度所对应的密度值相当)。

需要注意的是，如果用户对所有的流体介质都使用 Boussinesq 近似，那么，就不再使用操作密度，因此用户也不必设定它。

11.5.5 浮力驱动流动的求解策略

对于高瑞利数流动，用户可以采纳下面的求解策略。另外，11.2.3 节介绍的关于其它传热问题的求解策略也适用于浮力驱动流的求解。但需指出的是，对于某些层流和高瑞利数流动，不存在（物理和数学上的）稳态解。

高瑞利数流动的求解策略

当求解高瑞利数流动（Ra>10^8）问题时，为了获得最好的结果，用户应按如下之一的策略进行问题求解：

第一种方法使用稳态计算模型：

1. 首先计算低瑞利数流动（例如，10^7），使用一阶差分格式，获得收敛解。
2. 更改重力加速度（例如，9.8～0.098，瑞利数就减少了两个量级）从而更改有效瑞利数。
3. 把前面的求解结果作为高瑞利数流动的初值，并且使用一阶差分格式。
4. 用一阶格式获得收敛解之后，使用高阶格式继续进行计算。

第二种方法使用时间推进方法（瞬态计算模型）来获得稳态问题的解：

1. 计算具有相同或较低瑞利数的稳态流动
2. 按下式估计时间常数[16]：

$$\tau = \frac{L}{U} \sim \frac{L^2}{\alpha}\left(\Pr Ra\right)^{-1/2} = \frac{L}{\sqrt{g\beta\Delta TL}} \qquad (11.5.8)$$

其中，L,U 分别为长度与速度尺度。计算的时间步长 Δt 为：

$$\Delta t \approx \frac{\tau}{4} \qquad (11.5.9)$$

时间步长 Δt 过大可能会造成计算发散。

3. 当振荡（典型频率为 $f_\tau = 0.05 \sim 0.09$）逐渐减弱时，计算结果就达到了稳态（振荡为某个流动变量在物理时间尺度上的振荡，其频率也为物理时间意义上的频率）。需要注意的是，τ 是由方程 11.5-8 所估计的时间常数。f 为振荡频率（Hz）。一般而言，这个计算过程可能要推进 5000 个时间步长才能达到稳态。

11.5.6 浮力驱动流动的后处理

浮力流动的后处理与其它传热计算的后处理相同。细节请参阅 11.2.4 节。

参考文献

索引号	作者	文献名	出版单位	所在章节	文献查询地点
16	A. Bejan	*Convection Heat Transfer*.	John Wiley and Sons, New York, 1984	11.5.5	
41	A. Coppalle and P. Vervisch	The Total Emissivities of High-Temperature Flames	*Combust. Flame*, 49:101-108, 1983	11.3.8	
59	D. K. Edwards and R. Matavosian.	Scaling Rules for Total Absorptivity and Emissivity of Gases.	*J. Heat Transfer*, 106:684-689, 1984.	11.3.8	
37	E. H. Chui and G. D. Raithby	Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method.	*Numerical Heat Transfer, Part B*, 23:269-288, 1993	13.1	
183	G. D. Raithby and E. H. Chui.	A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media	*J. Heat Transfer*, 112:415-423, 1990	13.1	
165	J. Y. Murthy and S. R. Mathur.	A Finite Volume Method For Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes.	AIAA-98-0860, January 1998	11.3.6	
40	M. F. Cohen and D. P. Greenberg	The Hemi-Cube: A Radiosity Solution for Complex Environments.	*Computer Graphics*, 19(3):31-40, 1985.	11.3.12	
160	M. F. Modest.	The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer	*J. Heat Transfer*, 113:650-656, 1991	11.3.8	
161	M. F. Modest.	*Radiative Heat Transfer*	Series in Mechanical Engineering. McGraw Hill, 1993.	11.3.6	
30	M. G. Carvalho, T. Farias, and P. Fontes.	Predicting Radiative Heat Transfer in Absorbing, Emitting, and Scattering Media Using the Discrete Transfer Method.	In W.A. Fiveland et al., editor, *Fundamentals of Radiation Heat Transfer*, volume 160, pages 17-26. ASME HTD, 1991	13.1	
49	M. K. Denison and B. W. Webb.	A Spectral Line-Based Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary RTE Solvers	*J. Heat Transfer*, 115:1002-1012, 1993	11.3.8	
171	M. N. Ozisik.	*Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection*	Wiley, New York, 1973	13.3.4	
208	N. G. Shah.	*A New Method of Computation of Radiant Heat Transfer in Combustion Chambers*.	PhD thesis, Imperial College of Science and Technology, London, England, 1979.	13.1	
240	P. B. Taylor and P. J. Foster.	Some Gray Weighting Coefficients for CO_2-H_2O-Soot Mixtures	*Int. J. Heat Transfer*, 18:1331-1332, 1974	11.3.8	
35	P. Cheng.	Two-Dimensional Radiating Gas Flow by a Moment Method.	*AIAA Journal*, 2:1662-1664, 1964.	13.1	
211	R. Siegel and C. M. Spuckler.	Effect of Refractive Index and Diffuse or Specular Boundaries on a Radiating Isothermal Layer	*J. Heat Transfer*, 116:787-790, 1994.	11.3.6	
210	R. Siegel and J. R. Howell.	*Thermal Radiation Heat Transfer*	Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C., 1992.	13.1	
199	S. S. Sazhin	An Approximation for the	Manuscript, Fluent	11.3.8	

		Absorption Coefficient of Soot in a Radiating Gas	Europe, Ltd., 1994	
173	S. V. Patankar, C. H. Liu, and E. M. Sparrow.	Fully Developed Flow and Heat Transfer in Ducts Having Streamwise-Periodic Variations of Cross-Sectional Area	*ASME J. of Heat Transfer*, 99:180-186, 1977.	11.4.1
219	T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman.	Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model	*J. Heat Transfer*, 104:602-608, 1982	11.3.8

第十二章 组分输运和反应流介绍

FLUENT 提供了几种化学组分输运和反应流的模型，本章大致介绍一下这些模型。详细的模型请参阅第十三章到第十六章，第十七章介绍污染形成模型。

12.1 组分与化学反应模拟概述

FLUENT 可以模拟具有或不具有组分输运的化学反应。不待化学反应的组分输运建模请参阅 13.4 节

下面是 Fluent 可以模拟的几种化学反应：

- 可能包括 NOx 和其它污染形成的气相反应。
- 在固体（壁面）处发生的表面反应（如化学蒸汽沉积）。
- 粒子表面反应（如炭颗粒的燃烧），其中的化学反应发生在离散相粒子表面。

19.3 节会介绍液滴/粒子反应模拟的其它信息。

12.2 反应模拟的方法

FLUENT 提供了四种模拟反应的方法：

- 通用有限速度模型
- 非预混和燃烧模型
- 预混和燃烧模型
- 部分预混和燃烧模型

以下四节会大致介绍一下上面四种模型。12.3 节对模型的选择做大致的介绍。

12.2.1 通用有限速度模型

该方法基于组分质量分数的输运方程解，采用你所定义的化学反应机制，对化学反应进行模拟。反应速度在这种方法中是以源项的形式出现在组分输运方程中的，计算反应速度有几种方法：从 Arrhenius 速度表达式计算，从 Magnussen 和 Hjertager [149]的漩涡耗散模型计算或者从 EDC 模型[148]计算。这些模型的应用范围是非常广泛的，其中包括预混和，部分预混和和非预混和燃烧，详细内容请参阅第 13 章。

12.2.2 非预混和燃烧模型

在这种方法中，并不是解每一个组分输运方程，而是解一个或两个守恒标量（混和分数)的输运方程,然后从预测的混合分数分布推导出每一个组分的浓度。该方法主要用于模拟湍流扩散火焰。对于有限速度公式来说，这种方法有很多优点。在守恒标量方法中，通过概率密度函数或者 PDF 来考虑湍流的影响。反映机理并不是由我们来确定的，而是使用 flame sheet（mixed-is-burned）方法或者化学平衡计算来处理反应系统。具体请参阅第十四章。

层流 flamelet 模型是非预混和燃烧模型的扩展，它考虑到了从化学平衡状态形成的空气动力学的应力诱导分离，具体请参阅 14.4 节。

12.2.3 预混和燃烧模型

这一方法主要用于完全预混合的燃烧系统。在这些问题中，完全的混合反应物和燃烧产物被火焰前缘分开。我们解出反应发展变量来预测前缘的位置。湍流的影响是通过考虑湍流火焰速度来计算得出的。具体请参阅第 15 章。

12.2.4 部分预混和燃烧模型

顾名思义，部分预混和燃烧模型就是用于描述非预混和燃烧和完全预混和燃烧结合的系统。在这种方法中，我们解出混合分数方程和反应发展变量来分别确定组分浓度和火焰前缘位置。具体请参阅第十六章。

12.3 反应模型的选择

解决包括组分输运和反应流动的任何问题，首先都要确定什么模型合适。模型选取的大致方针如下：

- 通用有限速度模型主要用于：化学组分混合、输运和反应的问题；壁面或者粒子表面反应的问题（如化学蒸气沉积）。关于通用有限速度模型的详细介绍请参阅第十三章。
- 非预混和燃烧模型主要用于：包括湍流扩散火焰的反应系统，这个系统接近化学平衡，其中的氧化物和燃料以两个或者三个流道分别流入所要计算的区域。具体请参阅第十四章。
- 预混和燃烧模型主要用：于单一、完全预混和反应物流动。具体请参阅第十五章。
- 部分预混和燃烧模型主要用于：区域内具有变化等值比率的预混和火焰的情况，具体请参阅第十六章。

第十三章 物质输送和有限速率化学反应

FLUENT 可以通过求解描述每种组成物质的对流、扩散和反应源的守恒方程来模拟混合和输运，可以模拟多种同时发生的化学反应，反应可以是发生在大量相（容积反应）中，和/或是壁面、微粒的表面。包括反应或不包括反应的物质输运模拟能力，以及当使用这一模型时的输入将在本章中叙述。

注意你可能还希望使用混合物成分的方法（对非预混系统，在 14 章介绍）、反应进程变量的方法（对预混系统，在 15 章介绍），或部分预混方法（在 16 章介绍）来模拟你的反应系统。见 12 章 **FLUENT** 中反应模拟方法的概述。

本章中的分为以下章节：

- 13.1 容积反应
- 13.2 壁面表面反应和化学蒸汽沉积
- 13.3 微粒表面反应
- 13.4 无反应物质输运

13．1 容积反应

与容积反应有关的物质输运和有限速率化学反应方面的信息在以下小节中给出：

- 13.1.1 理论
- 13.1.2 模拟物质输运和反应的用户输入概述
- 13.1.3 使能物质输运和反应，并选择混合物材料
- 13.1.4 混合物和构成物质的属性定义
- 13.1.5 定义物质的边界条件
- 13.1.6 定义化学物质的其他源项
- 13.1.7 化学混合和有限速率化学反应的求解过程
- 13.1.8 物质计算的后处理
- 13.1.9 从 **CHEMKIN** 导入一个化学反应机理

13.1.1 理论

物质输运方程

当你选择解化学物质的守恒方程时，**FLUENT** 通过第 i 种物质的对流扩散方程预估每种物质的质量分数，Y_i。守恒方程采用以下的通用形式：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho Y_i\right)+\nabla\cdot\left(\rho\vec{v}Y_i\right)=-\nabla\vec{J}_i+R_i+S_i \qquad (13.1\text{-}1)$$

其中 R_i 是化学反应的净产生速率（在本节稍后解释），S_i 为离散相及用户定义的源项导致的额外产生速率。在系统中出现 N 种物质时，需要解 N-1 个这种形式的方程。由于质量分数的和必须为 1，第 N 种物质的分数通过 1 减去 N-1 个已解得的质量分数得到。为了使数值误差最小，第 N 种物质必须选择质量分数最大的物质，比如氧化物是空气时的 N_2。

层流中的质量扩散

在方程 13.1-1 中，J_i 是物质 i 的扩散通量，由浓度梯度产生。缺省时，**FLUENT** 使用稀释近似，这样扩散通量可记为：

$$J_i=-\rho D_{i,m}\nabla Y_i \qquad (13.1.2)$$

这里 $D_{i,m}$ 是混合物中第 i 种物质的扩散系数。

对于确定的层流流动，稀释近似可能是不能接受的，需要完整的多组分扩散。在这些例子中，可以解 **Maxwell-Stefan** 方程，详细情况见 7.7.2 节。

湍流中的质量扩散

在湍流中，**FLUENT** 以如下形式计算质量扩散：

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\nabla Y_i \qquad (13.1.3)$$

其中 Sc_t 是湍流施密特数，$\frac{\mu_t}{\rho D_t}$（缺省设置值为 0.7）。

注意，湍流扩散一般淹没层流扩散，在湍流中指定详细的层流性质是不允许的。

能量方程中的物质输送处理

在许多多组分混合流动中，物质扩散导致了焓的传递。

$$\nabla\left[\sum_{i=1}^{n} h_i \vec{J}_i\right]$$

这种扩散对于焓场有重要影响，不能被忽略。特别是，当所有物质的 **Lewis** 数

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \qquad （13.1\text{-}4）$$

远离 1 时，忽略这一项会导致严重的误差。

FLUENT 缺省地包含这一项。在方程 13.1-4 中，k 为热导率。

进口处的扩散

在 **FLUENT** 的非耦合求解器中，入口的物质净输送量由对流量和扩散量组成，对耦合解算器，只包括对流部分。对流部分由你指定的物质浓度确定。扩散部分依赖于计算得到的物质浓度场。因此，扩散部分（从而使净输送量）不预先指定。见 13.1.5 节有关指定入口净输送量的信息。

反应建模的一般有限速率形式

反应速率作为源项在方程 13.1-1 中出现，在 **FLUENT** 中根据以下三种模型中的一个计算：

层流有限速率模型：忽略湍流脉动的影响，反应速率根据 Arrhenius 公式确定。

涡耗散模型：认为反应速率由湍流控制，因此避开了代价高昂的 Arrhenius 化学动力学计算。

涡耗散概念（EDC）模型：细致的 Arrhenius 化学动力学在湍流火焰中合并。注意详尽的化学动力学计算代价高昂。

通用有限速率对于范围很广的应用，包括层流或湍流反应系统，预混、非预混、部分预混燃烧系统都适用。

层流有限速率模型

层流有限速率模型使用 Arrhenius 公式计算化学源项，忽略湍流脉动的影响。这一模型对于层流火焰是准确的，但在湍流火焰中 Arrhenius 化学动力学的高度非线性，这一模型一般不精确。对于化学反应相对缓慢、湍流脉动较小的燃烧，如超音速火焰可能是可以接受的。

化学物质 i 的化学反应净源项通过有其参加的 N_R 个化学反应的 Arrhenius 反应源的和计算得到。

$$R_i = M_{w,i}\sum_{i=1}^{N_r}\hat{R}_{i,r}$$

其中 $M_{w,i}$ 是第 i 种物质的分子量，$\hat{R}_{i,r}$ 为第 i 种物质在第 r 个反应中的产生/分解速率。反应可能发生在连续相反应的连续相之间，或是在表面沉积的壁面处，或是发生在一种连续相物质的演化中。

考虑以如下形式写出的第 r 个反应：

$$\sum_{i=1}^{N} \nu'_{i,r} M_i \underset{k_{b,r}}{\longleftrightarrow} \sum_{i=1}^{N} \nu''_{i,r} M_i \qquad (13.1\text{-}6)$$

其中 N ——系统中化学物质数目；

$\nu'_{i,r}$ ——反应 r 中反应物 i 的化学计量系数;

$\nu''_{i,r}$ ——反应 r 中生成物 i 的化学计量系数;

M_i ——第 i 种物质的符号；

$k_{f,r}$ ——反应 r 的正向速率常数；

$k_{b,r}$ ——反应 r 的逆向速率常数；

方程 13.1-6 对于可逆和不可逆反应（**FLUENT** 中缺省为不可逆）都适用。对于不可逆反应，逆向速率常数 $k_{b,r}$ 简单地被忽略。

方程 13.1-6 中的和是针对系统中的所有物质，但只有作为反应物或生成物出现的物质才有非零的化学计量系数。因此，不涉及到的物质将从方程中清除。

反应 r 中物质 i 的产生/分解摩尔速度以如下公式给出：

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma\left(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}\right)\left(k_{f,r}\prod_{j=1}^{N_r}\left[C_{j,r}\right]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r}\prod_{j=1}^{N_r}\left[C_{j,r}\right]^{\eta''_{j,r}}\right) \qquad (13.1\text{-}7)$$

其中：N_r ——反应 r 的化学物质数目；

$C_{j,r}$ ——反应 r 中每种反应物或生成物 j 的摩尔浓度；

$\eta'_{j,r}$ ——反应 r 中每种反应物或生成物 j 的正向反应速度指数；

$\eta''_{j,r}$ ——反应 r 中每种反应物或生成物 j 的逆向反应速度指数；

见 13.1.4 节有关输入整体正向反应（不可逆）和单元反应（可逆）的化学计量系数和速率指数方面的内容。

Γ 表示第三体对反应速率的净影响。这一项由下式给出：

$$\Gamma = \sum_{j}^{N_r} \gamma_{j,r} C_j \qquad (13.1\text{-}8)$$

其中 $\gamma_{j,r}$ 为第 r 个反应中第 j 种物质的第三体影响。在缺省状态，FLUENT 在反应速率计算中不

包括第三体影响。但是当你有它们的数据时，你可以选择包括第三体影响。

反应 r 的前向速率常数 $k_{f,r}$ 通过 Arrhenius 公式计算：

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \qquad (13.1\text{-}9)$$

其中，A_r——指数前因子（恒定单位）；

β_r——温度指数（无量纲）；

E_r——反应活化能($J/kmol$);

R——气体常数（ $J/kmol \cdot K$ ）

你（或者数据库）可以在 **FLUENT** 的问题定义中提供$\nu'_{i,r}, \nu''_{i,r}, \eta'_{j,r}, \eta''_{j,r}, \beta_r, A_r, E_r$，并可选择提供$\gamma_{j,r}$。

如果反应是可逆的，逆向反应常数$k_{b,r}$可以根据以下关系从正向反应常数计算：

$$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r} \qquad (13.1\text{-}10)$$

其中K_r为平衡常数，从下式计算：

$$K_r = \exp\left(\frac{\Delta S_r^0}{R} - \frac{\Delta H_r^0}{RT}\right)\left(\frac{p_{\rm atm}}{RT}\right)^{\sum_{r=1}^{N_R}(\nu''_{j,r} - \nu'_{j,r})} \qquad (13.1\text{-}11)$$

其中 p_{atm} 表示大气压力（101325Pa）。指数函数中的项表示 Gibbs 自由能的变化，其各部分按下式计算：

$$\frac{\Delta S_r^0}{R} = \sum_{i=1}^{N}\left(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}\right)\frac{S_i^0}{R} \qquad (13.1\text{-}12)$$

$$\frac{\Delta H_r^0}{RT} = \sum_{i=1}^{N}\left(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}\right)\frac{h_i^0}{RT} \qquad (13.1\text{-}13)$$

其中S_i^0和h_i^0是标准状态的熵和标准状态的焓（生成热）。这些值在 FLUENT 中作为混合物材料的属性指定。

压力独立反应

FLUENT 可以用以下三种方法之一来表示压力独立反应（或压力下降）反应的速率表达式。“压力下

降”反应是发生在 Arrhenius 高压和低压限制之间的反应，因而不仅仅依赖于温度。

有三种方法表示在“fall-off”区域的速率表达式，最简单的是 Lindemann[140]形式。还有其它良种相关的方法，Troe 方法[77]和 SRI 方法[230]，它们提供了更精确的”fall-off”区域表达形式。

Arrhenius 速率参数对于高压和低压限制都是需要的。两个限制的速率系数融合以产生光滑的压力独立表达式。在 Arrhenius 形式中，高压限制 k 和低压限制 k_{low} 的参数如下：

$$k = AT^{\beta}e^{-E/RT} \quad (13.1\text{-}14)$$

$$k_{\mathrm{low}} = A_{\mathrm{low}}T^{\beta_{\mathrm{low}}}e^{-E_{\mathrm{low}}/RT} \quad (13.1\text{-}15)$$

在任意压力下，净反应速率常数为：

$$k_{\mathrm{net}} = k\left(\frac{p_r}{1+p_r}\right)F \quad (13.1\text{-}16)$$

其中 p_r 定义为：

$$p_r = \frac{k_{\mathrm{low}}[M]}{k} \quad (13.1\text{-}17)$$

$[M]$ 为溶液气体的浓度，可以包括第三体效率。如果方程 13.1-16 函数 F 为 1，则是 Lindemann 形式。**FLUENT** 提供了两种其他形式来表述 F，称为 Troe 方法和 SRI 方法。

在 Troe 方法中，F 按下式给出：

$$\log F = \left\{1+\left[\frac{\log p_r + c}{n - d(\log p_r + c)}\right]^2\right\}^{-1}\log F_{\mathrm{cent}} \quad (13.1\text{-}18)$$

其中，

$$c = -0.4 - 0.67\log F_{\mathrm{cent}} \quad (13.1\text{-}19)$$

$$n = 0.75 - 1.27\log F_{\mathrm{cent}} \quad (13.1\text{-}20)$$

$$d = 0.14 \quad (13.1\text{-}21)$$

$$F_{\mathrm{cent}} = (1-\alpha)e^{-T/T_3} + \alpha e^{-T/T_1} + e^{-T_2/T} \quad (13.1\text{-}22)$$

参数 α, T_3, T_2, T_1 做为输入确定。

在 SRI 方法中，缝合函数 F 近似为

$$F = d\left[a\exp\left(\frac{-b}{T}\right) + \exp\left(\frac{-T}{c}\right)\right]^X T^e \quad (13.1\text{-}23)$$

$$X = \frac{1}{1+\log^2 p_r} \quad (13.1\text{-}24)$$

除了低压限制表达式中的三个 **Arrhenius** 参数以外，你还需要提供 F 表达式中的 a, b, c, d, e。

！化学动力学机理中有很高的非线性并且形成了一组强烈耦合的方程。求解过程指导见 13.1.7 节。

如果你有一个 **CHEMKIN** 形式的化学反应机理[112]，你可以将这一机理导入 **FLUENT**，如 13.1.9 节。

涡耗散模型

大部分燃料快速燃烧。整体反应速率由湍流混合控制。在非预混火焰中，湍流缓慢地通过对流/混合燃料和氧化剂进入反应区，在反应区它们快速地燃烧。在预混火焰中，湍流对流/混合冷的反应物和热的生成物进入反应区，在反应区迅速地发生反应。在这些情况下，燃烧称为混合限制的，复杂，常常是未知的化学反应动力学速率可以安全地忽略掉。

FLUENT 提供了湍流-化学反应相互作用模型，基于 Magnussen 和 Hjertager[149]的工作，称为涡耗散模型。

反应 r 中物质 i 的产生速率 $R_{i,r}$ 由下面两个表达式中较小的一个给出：

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min_{\mathcal{R}} \left(\frac{Y_{\mathcal{R}}}{\nu'_{\mathcal{R},r} M_{w,\mathcal{R}}} \right) \quad (13.1\text{-}25)$$

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N \nu''_{j,r} M_{w,j}} \quad (13.1\text{-}26)$$

where Y_P is the mass fraction of any product species, P
$Y_{\mathcal{R}}$ is the mass fraction of a particular reactant, $\mathcal{R}$
A is an empirical constant equal to 4.0
B is an empirical constant equal to 0.5

在方程 13.1-25 和 13.1-26 中，化学反应速率由大涡混合时间尺度 k/ε 控制，如同 Splading[227]的涡破碎模型一样。只要湍流出现（$k/\varepsilon > 0$），燃烧即可进行，不需要点火源来启动燃烧。这通常对于非预混火焰是可接受的，但在预混火焰中，反应物一进入计算区域（火焰稳定器上游）就开始燃烧。为了修正这一点，**FLUENT** 提供了有限速率/涡耗散模型，其中 Arrhenius（方程 13.1-7）和涡耗散(方程 13.1-25 和 13.1-26)反应速率都进行计算。净反应速率取两个速率中较小的。实际上，Arrhenius 反应速率作为一种动力学开关，阻止反应在火焰稳定器之前发生。一旦火焰被点燃，涡耗散速率通常会小于 Arrhenius 反应速率，并且反应是混合限制的。

！尽管 FLUENT 允许采用涡耗散模型和有限速率/涡耗散模型的多步反应机理（反应数>2），但可能会产生不正确的结果。原因是多步反应机理基于 Arrhenius 速率，每个反应的都不一样。在涡耗散模型中，每个反应都有同样的湍流速率，因而模型只能用于单步（反应物—产物）或是双步（反应物—中间产物，中间产物—产物）整体反应。模型不能预测化学动力学控制的物质，如活性物质。为合并湍流流动中的多步化学动力学机理，使用 EDC 模型（下面介绍）。

！涡耗散模型需要产物来启动反应（见方程 13.1-26）。当你初始化求解的时候，**FLUENT** 设置产物的质量比率为 0.01，通常足够启动反应。但是，如果你首先聚合一个混合解，其中所有的产物质量比率都为 0，你可能必须在反应区域中补入产物以启动反应。详细内容见 13.1.7 节。

LES 的涡耗散模型

当使用 LES 湍流模型时，湍流混合速率（方程 13.1-25 和 13.1-26 中的 ε/k）被亚网格尺度混合速率替代。计算为：

$$\tau_{sgs}^{-1} = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (13.1\text{-}27)$$

where

$$\tau_{sgs}^{-1} = \text{subgrid-scale mixing rate } (\text{s}^{-1})$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) = \text{strain rate tensor } (\text{s}^{-1})$$

涡-耗散-概念（EDC）模型

涡-耗散-概念（EDC）模型是涡耗散模型的扩展，以在湍流流动中包括详细的化学反应机理[148]。它假定反应发生在小的湍流结构中，称为良好尺度。良好尺度的容积比率按下式模拟[80]:

$$\xi^* = C_\xi \left(\frac{\nu \epsilon}{k^2}\right)^{3/4} \qquad (13.1\text{-}28)$$

其中*表示良好尺度数量，

C_ξ——容积比率常数=2.1377；

ν——运动粘度

认为物质在好的结构中，经过一个时间尺度

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2} \qquad (13.1\text{-}29)$$

后开始反应。

其中 $C\tau$ 为时间尺度常数，等于 0.4082

在 **FLUENT** 中，良好尺度中的燃烧视为发生在定压反应器中，初始条件取为单元中当前的物质和温度。反应经过时间尺度 τ^* 后开始进行，由方程 13.1-7 的 Arrhenius 速率控制，并且用普通微分方程求解器 **CVODE** 进行数值积分[45]。经过一个 τ^* 时间的反应后物质状态记为 Y_i^*

物质 i 的守恒方程 13.1-1 中的源项计算公式为：

$$R_i = \frac{\rho (\xi^*)^2}{\tau^* [1 - (\xi^*)^3]} (Y_i^* - Y_i) \qquad (13.1\text{-}30)$$

EDC 模型能在湍流反应流动中合并详细的化学反应机理。但是，典型的机理具有不同的刚性，它们的数值积分计算开销很大。因而，只有在快速化学反应假定无效的情况下才能使用这一模型，例如在快速熄灭火焰中缓慢的 CO 烧尽、在选择性非催化还原中的 NO 转化。

推荐使用双精度求解器以避免刚性机理中固有的大指数前因子和活化能产生的舍入误差。见 13.1.7 节获得使用 EDC 模型求解的指导。

13.1.2 物质输送和反应模拟输入概览

设定涉及物质输送和反应问题的基本步骤如下，每一步的详细执行过程见 13.1.3-13.1.5 节。有关设定和求解的附加信息在 13.1.6-13.1.8 节中提供。

1. 选定物质输送和容积反应，指定混合物材料。见 13.1.3 节（混合物材料概念在下面解释）。
2. 如果你还要模拟壁面或微粒表面反应，则要打开壁面和/或微粒表面反应。细节见 13.2 和 13.3 节。
3. 检查和/或定义混合物的属性。（见 13.1.4 节）。混合物属性包括：

- 混合物中的物质
- 反应
- 其他物理属性（如粘度、比热）

4.　检查和/或设置混合物中单个物质的属性（见 13.1.4 节）

5.　设置物质边界条件（见 13.1.5 节）

在很多情况下，当你选择混合物材料是，求解器从材料数据库中得到物质性质、反应等，因而你将不需要修改任何物理属性。但有一些性质可能在数据库中没有定义。如果有任何性质需要设置时，你将被警告，这样你可以指定这些性质的适当值。你还可能希望检查数据库中这些性质的值，以确定它们对你的应用是否正确。修改已存在的混合物材料或从最开始创建一个新的材料的详细内容见 13.1.4 节。混合物材料的修改包括以下方面：

- 物质的添加和删除
- 改变化学反应
- 修改混合物的其他材料属性
- 修改混合物本构物质的材料属性

如果你在求解一个反应流问题，你常常希望将混合物的比热定义为组成的函数，将每种物质的比热定义为温度的函数。你还可能对其它一些性质希望也做这样的定义。缺省状态下，将使用恒定的属性，但对一些物质的性质，在数据库中存在一个温度的分段多项式函数可供你使用。如果你知道更多适合于你的问题的函数的话，你还可以选择指定一个不同的温度依赖函数。

混合物材料

在 **FLUENT** 中提出混合物材料的概念以方便物质输送和反应流动的设置。混合物材料可以认为是一组物质和一列控制它们相互作用的规律。混合物材料带有以下性质：

- 一列本构物质，相对于"流体"物质
- 一列混合定律，指示如果希望得到组分依赖的属性，混合属性（密度，粘度，比热等）如何从单个物质得到
- 如果希望属性不依赖组分，直接指定混合物属性
- 其它与耽搁物质无关的材料属性（如吸收和辐射系数）
- 一组反应，包括反应类型（有限速率，涡耗散等）和化学计量和速率常数

混合物材料和流体材料都储存在 **FLUENT** 的材料数据库中。包括许多常见的混合物材料（如甲烷-空气，丙烷-空气）。通常，在数据库中定义了一步/两步反应机理和大量混合物及其构成物质的属性。当你指定了你希望使用哪种混合物材料后，适当的混合物材料，流体材料和属性将被装载到求解器中。如果缺少任何所选材料（或构成流体材料）必须的属性，求解器将通知你需要指定它。另外，你可以选择修改任何预定义的属性。见 7.1.2 节了解有关 **FLUENT** 数据库属性数据源的信息。

例如，如果你计划模拟一种甲烷-空气的燃烧，你不需要明确指定反应中涉及的物质和反应本身。只需要简单地选择甲烷-空气作为使用的混合物材料，相关的物质（CH_4，O_2，CO_2，H_2O 和 N_2）和反应数据将从数据库装入求解器。然后你可以检查物质、反应和其它属性并定义其它任何缺少的属性，和/或修改任何你希望使用不同值或函数的属性。通常你希望定义一个与组分、温度相关的比热，还可能希望将其它属性定义为温度和/或组分的函数。

混合物材料的使用给你提供了一种灵活性，可以使用大量预定义混合物中的一种，修改这些混合物，或是创建你自己的混合物材料。自定义混合物材料在 **Materials** 面板中进行，在 13.1.4 节中讲述。

13.1.3　选定物质输送和反应，并选择混合物材料

物质输送和容积反应的问题设置总物质模型（**Species Model**）面板开始（图 13.1.1）。

Define → Models → Species...

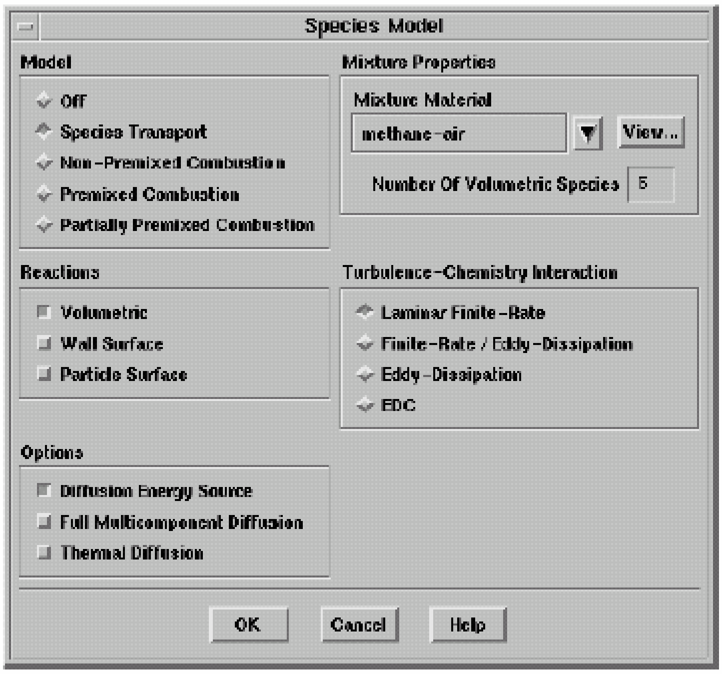


Figure 13.1.1: The Species Model Panel

1. 在 **Model** 下，选择 **Species Transport.**
2. 在 **Reaction** 下，选择 **Volumetric reactions**
3. 在 **Mixture Properties** 下的 **Mixture Material** 下拉列表中选择在你的问题中希望使用的混合物材料

下拉列表中将包括所有在当前数据库中定义的混合物。为检查一种混合物材料的属性，选择它，并点击 **View…**按纽。如果你所希望使用的混合物不在列表中，选择混合物模板（**mixture-template**）材料，并参阅 13.1.4 节了解设置你自己的混合物属性的详细内容。如果有一种混合物材料和你你所希望使用的混合物相似，可以选择这一材料并参阅 13.1.4 节修改已存在材料性质的详细信息。

当选择 **Mixture Material** 时，混合物中的 **Number of Volumetric Species** 将在面板中显示，表达你的信息。

!注意如果你在已经选定物质输送后，重新打开 Species Model 面板时，只有你的案例中可得到的混合物材料才会显示在列表中。你可以通过从数据库中拷贝在你的案例中增加更多混合物材料，如 7.1.2 节所述，或是创建一个新的混合物，如 7.1.2 节和 13.1.4 节所述。

正如在 13.1.2 节中提到的，物质输送的模拟参数和反应（如果有关）将自动从数据库中装入。如果缺少任何信息，当你点击 **Species Model** 面板中的 **OK** 按纽后将被告知缺少什么。如果你希望检查或修改混合物材料的任何属性，你将使用 **Materials** 面板，如 13.1.4 节所述。

4. 选择湍流-化学反应相互作用模型，可以使用四种模型：

层流有限速率：只计算 Arrhenius 速率（见方程 13.1-7），并忽略湍流-化学反应相互作用。

涡耗散模型（针对湍流流动）： 只计算混合速率（方程 13.1-25 和方程 13.1-26）。

有限速率/涡耗散模型（针对湍流流动）：计算 Arrhenius 速率和混合速率，并使用其中较小的一个。

EDC 模型（湍流流动）：使用详细的化学反应机理模拟湍流-化学反应相互作用（见方程 13.1-25 和 13.1-26）。

5. 如果你选择 EDC 模型，你可以选择修改容积比率常数和时间尺度常数（方程 13.1-28 中的$C\varepsilon$和方程 13.1-29 中的$C\tau$，尽管通常推荐缺省值。此外，为减少化学反应计算的开销，你可以增加每次化学反应更新的流动迭代（**Flow Iteration Per Chemistry Update**）次数。缺省时，**FLUENT** 每十次流动迭代更新化学反应一次。

6．（可选）如果你希望模拟完整的多组分扩散或热扩散，打开完整多组分扩散或热扩散 **Full Multicomponent Diffusion** 或 **Thermal Diffusion** 选项。

13.1.4 定义混合物的属性和构成物质

如 13.1.2 节所讨论的，如果你使用来自数据库的混合物材料，大部分混合物和物质属性已经定义了。你可以跟随这一节的过程检查当前的属性、修改某些属性或是设定一个你从头开始定义的全新的混合物材料的所有属性。

记住你将需要定义混合物材料和其构成物质的属性。由于物质属性输入可能依赖于你定义混合物属性的方法，在设定构成物质的属性之前定义混合物属性非常重要。建议按照如下的属性输入顺序：

1. 定义混合物物质和反应，定义混合物物理属性。记住在设定混合物材料属性时点击 **Change/Create** 按纽。
2. 定义混合物中物质的物理属性。记住在设定了每种物质的属性后点击 **Change/Create** 按纽。

所有这些步骤都在 **Materials** 面板中进行，在本节中将详细叙述。

Define → Materials...

定义混合物中的物质

如果你使用数据库中的混合物材料，混合物中的物质已经为你定义了。如果你创建你自己的材料或是修改已存在材料中的物质，你将需要自己定义它们。

在 **Materials** 面板中（图 13.1.2），检查材料类型 **Material Type** 是否已经设置为混合物，并且你的混合物是否已经在混合物材料列表 **Mixture Materials list** 中选定。点击 **Mixture Species** 右边的 **Edit…**按纽打开 **Species** 面板（图 13.1.3）。

Species 面板概览

在 **Species** 面板中，已选物质 **Selected Species** 列表显示所有混合物中的流体相物质。如果你模拟壁面或微粒表面反应，已选物质 **Selected Species** 列表将显示所有混合物中的表面物质。表面物质是那些从壁面边界或是离散相微粒(如 Si(s))产生或散发出来的，以及在流体相物质中不存在的物质。表面物质和壁面反应将在 13.2 节中叙述，微粒表面反应的有关内容见 13.3 节。

！已选物质 **Selected Species** 列表中物质的顺序非常重要。**FLUENT** 认为列表中最后的物质是大量的物质。因此，当你从混合物材料中增加或是删除物质时，必须小心将最丰富（按质量）的物质作为最后一个物质。

可获得的物质 **Available Material** 列表显示可获得，但不在混合物中的材料。通常你可以在列表中看到空气 air，因为缺省时，空气通常是可获得的。

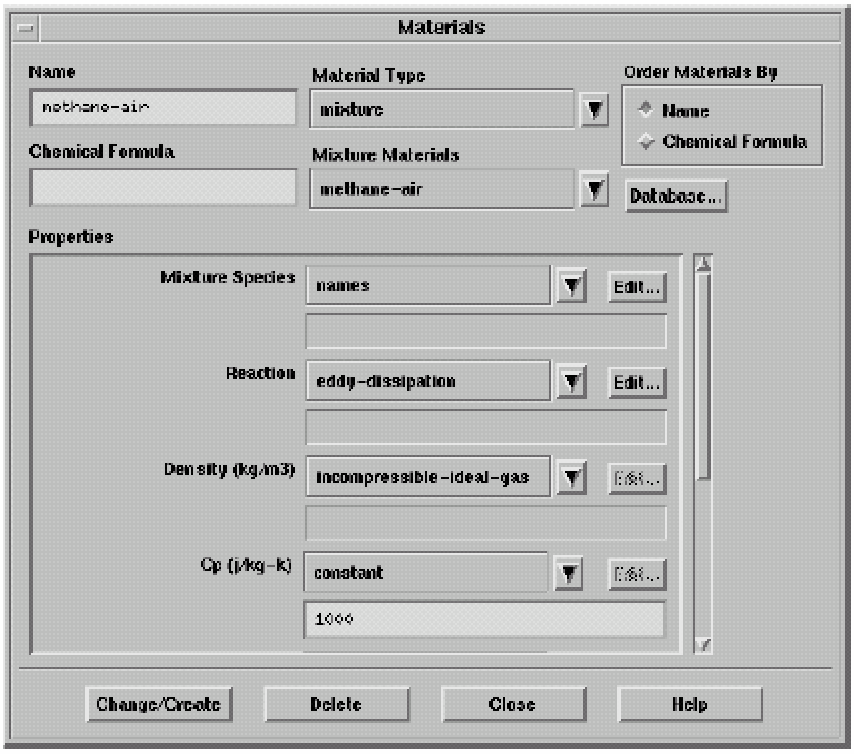


Figure 13.1.2: The Materials Panel (showing a mixture material)

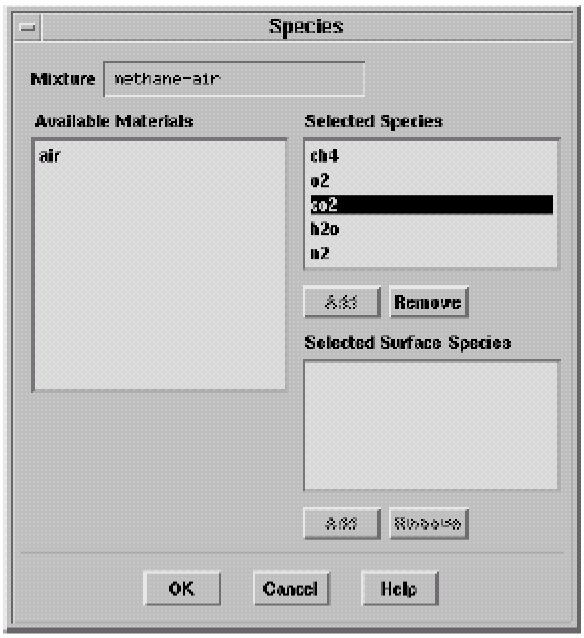


Figure 13.1.3: The Species Panel

在混合物中增加物质

如果你从头创建了一个混合物，或者从一种已存在的混合物开始并增加一些缺少的物质，你首先需要从数据库中导入希望的物质（或是创建它们，如果它们不在数据库中出现的话），以便在求解器中可以得到，增加物质的过程在下面列出。（在开始前你需要关闭 **Species** 面板，因为它是一个模式面板，不允许在它打开的时候做别的事）

1. 在 **Materials** 面板中，点击 **Datebase…**按纽以打开 **Database Materials** 面板，并拷贝希望的物

质，如 7.1.2 节所述。记住混合物的构成物质是流体材料，因而你需要在 **Database Materials** 面板中选择 **Fulid Material Type** 来看到正确的选择列表。注意可获得的固体物质（对表面反应）同样也在流体列表中。

！　如果你在数据库中没有见到你搜寻的物质，可以创建对这种物质创建一个新的流体材料，依造 7.1.2 节中的指导，然后继续以下的第二步。

2. 再次打开上面提到的 **Species** 面板。你将看到你从数据库拷贝（或创建）的流体材料在 **Available Materials** 列表中列出。
3. 为了在混合物中增加一种物质，在 **Available Materials** 列表中选择它，并点击 **Selected Species** 列表下面（或是 **Selected Surface Species** 列表下面，以定义一种表面物质）的 **Add** 按纽。这种物质将从 **Available Materials** 列表移动到 **Selected Species**(或 **Selected Surface Species**)列表的末尾。
4. 对所有希望的物质重复上述步骤。结束后点击 **OK** 按纽。

！　增加一种物质到列表中将改变物质的顺序。你必须确保列表中的最后一个物质是大量的物质，并且你需要检查你以前所设定的所有边界条件，欠松弛因子或其它求解参数，如详细叙述的那样。

在混合物中去除物质

为从混合物中去除一种物质，只需要简单地在 **Selected Species** 列表（或是 **Selected Surface Species** 列表）中选定它，并点击列表下的 **Remove** 按纽。这种物质将从列表中去除并增加到 Available Materials 列表中。

！　去除列表中的一种物质将改变物质的顺序。你必须确保列表中的最后一个物质是大量的物质，并且你需要检查你以前所设定的所有边界条件，欠松弛因子或其它求解参数，如详细叙述的那样。

重排物质

如果你发现 **Selected Species** 列表中最后一种物质不是最丰富的物质（应该是），你需要重排物质以得到正确的顺序。

1. 将最大量的物质从 **Selected Species** 列表中去除。它将出现在 **Available Materials** 列表中。
2. 再次增添这种物质，它将自动放在列表的末尾。

物质的命名和顺序

如上面讨论的，你必须在增加或去除物质时保持最丰富的物质作为 **Selected Species** 列表中的最后一种物质。在增加或去除物质时还需要知道的一些考虑事项在这里给出。

一种物质有三个特征在供求解器识别：名字，化学分子式和在 **Species** 面板中物质列表中的位置。改变这些特征将会产生以下效果：

- 你可以改变一种物质的名字（使用 **Materials** 面板，如 7.1.2 节所述），而不产生任何影响。
- 你不能改变一种物质的给定的化学分子式。
- 如果你增加或去除物质，将改变物质列表的顺序。这时，所有的边界条件，求解器参数和物质的求解数据将被从设为缺省值。（其它流动变量的求解数据，边界条件，求解器参数将不受影响）因此，如果你增加或去除物质，你需要注意这一新定义问题的物质边界条件和求解参数。另外，你必须认识到基于原来物质顺序给出的物质浓度或是存储在数据文件中的浓度将会与新定义的问题不匹配。你可以使用数据文件作为初始猜测值，但你必须知道数据文件中的物质浓度将可能对新定义的模型提供一种不好的初始猜测。

定义反应

如果你的 **FLUENT** 模型中涉及化学反应，你可以接着定义参与的已定义物质的反应。这只有在你从头开始创建一种混合物、修改了物质或是出于某些其他原因希望重定义反应时才是必须的。

在 **Materials** 面板的 **Reaction** 下拉列表中显示适当的反应机理，依赖于你在 **Species Model** 面板中选择的湍流-化学反应相互作用模型（见 13.1.3 节）。如果你使用层流有限速率或 EDC 模型，反应机理将是有限速率的，如果你使用涡耗散模型，反应机理将是涡耗散的；如果使用有限速率/涡耗散模型，反应机理将是有限速率/涡耗散的。

反应定义的输入

为定义反应，点击 **Reaction** 右侧的 **Edit…**按纽。

将打开 **Reaction** 面板（图 13.1.4）。

定义反应的步骤如下：

1. 在 **Total Number of Reaction** 区域中设定反应数目（容积反应，壁面反应和微粒表面反应）（使用箭头改变数值，或是键入值并按回车键。

注意如果你的模型包括离散相的燃烧微粒，只有在你计划使用表面燃烧的多表面反应模型时，才必须在反应数目中包括部分表面反应（s）（如碳的燃烧，多样碳粒氧化）

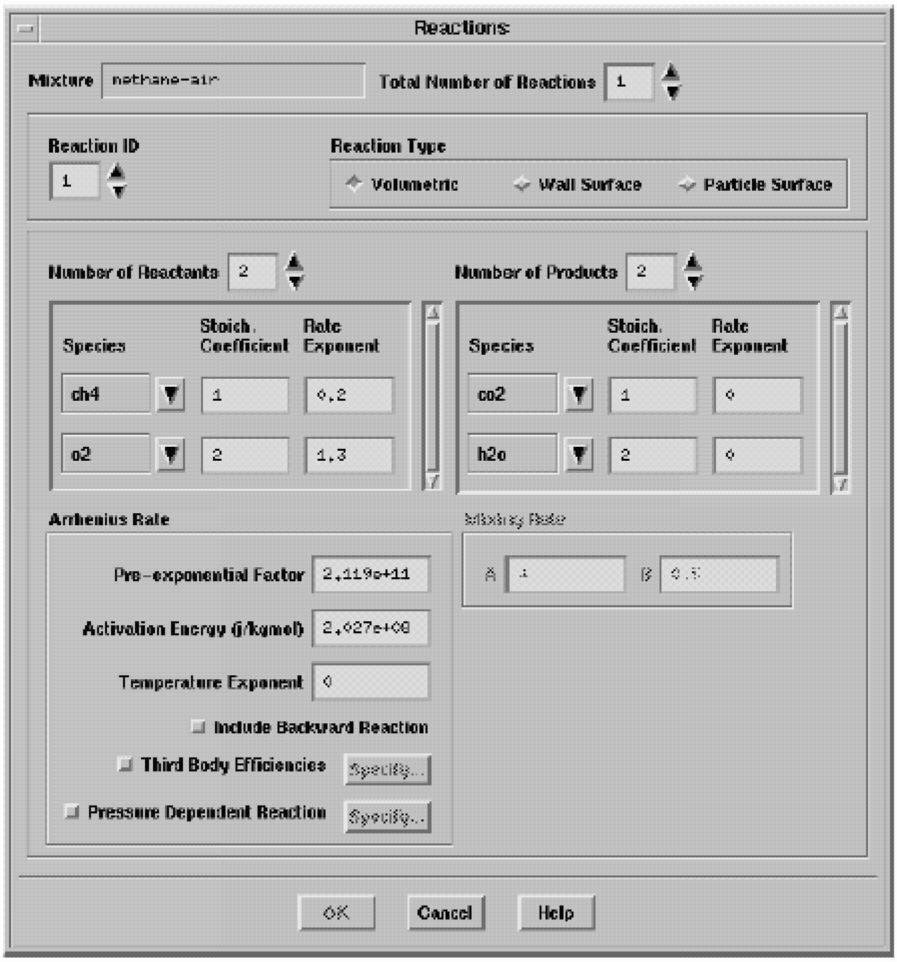


Figure 13.1.4: The Reactions Panel

2. 设定你希望定义的反应的 Reaction ID

   2. 如果是流体相反应，保持缺省选项 **Volumetric** 作为反应类型。如果是壁面反应（在 13.2 节中描述）或者颗粒表面反应（13.3 节描述），选择 **Wall Surface** 或 **Particle reaction** 作为反应类型。有关定义颗粒表面反应的进一步信息见 13.3.2 节。

3. 通过增加 **Number of Reactants** 和 **Number of Products** 的值指定反应中涉及的反应物和生成物的数

量。在 **Species** 下拉列表中选择每一种反应物或生成物，然后在 **Stoich. Coefficient** 和 **Rate Exponent** 区域中设定它的化学计量系数和速率指数。（化学计量系数是方程 13.1-6 中的常数$\gamma'_{i,r}$和$\gamma''_{i,r}$，速率指数是方程 13.1-7 中的常数$\eta'_{j,r}$和$\eta''_{j,r}$。共有两种普通类型的反应可以在 **Reactions** 面板中处理。因此正确输入每种反应的参数非常重要。反应的类型如下：

- 整体正向反应（无逆向反应）：产物一般不影响正向速率，因此所有产物的速率指数（$\eta''_{j,r}$）应该为 0。对于反应物，设定速率指数（$\eta'_{j,r}$）为期望的值。如果某种反应不是基元反应，速率指数一般不等于这种物质的化学计量系数。整体正向反应的一个实例是甲烷的燃烧：

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$$

where $\nu'_{CH_4} = 1$, $\eta'_{CH_4} = 0.2$, $\nu'_{O_2} = 2$, $\eta'_{O_2} = 1.3$, $\nu''_{CO_2} = 1$, $\eta''_{CO_2} = 0$, $\nu''_{H_2O} = 2$, and $\eta''_{H_2O} = 0$.

图 13.1.4 表示了甲烷燃烧的系数输入（还可在 DataBase Materials 面板中查阅甲烷/空气混合物材料）。

注意：在某些情况下，你可能希望模拟产物影响正向速率的反应。对于这些情况，设定产物速率指数（$\eta'_{j,r}$）为期望的值。这种反应的一个例子是气体转换反应（见 DataBase Materials 面板中的 CO/空气混合物材料），其中水的存在对反应速率有影响：

$$CO + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2O$$

在气体转换反应中，速率表达式可以定义为：

$$k[CO][O_2]^{1/4}[H_2O]^{1/2}$$

where $\nu'_{CO} = 1$, $\eta'_{CO} = 1$, $\nu'_{O_2} = 0.5$, $\eta'_{O_2} = 0.25$, $\nu''_{CO_2} = 1$, $\eta''_{CO_2} = 0$, $\nu''_{H_2O} = 0$, and $\eta''_{H_2O} = 0.5$.

- 可逆反应：假定每种物质的化学计量系数等于速率指数，这种反应的一个例子是 S02 氧化为 S03：

$$SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons SO_3$$

where $\nu'_{SO_2} = 1$, $\eta'_{SO_2} = 1$, $\nu'_{O_2} = 0.5$, $\eta'_{O_2} = 0.5$, $\nu''_{SO_3} = 1$, and $\eta''_{SO_3} = 1$.

参见下面的第 6 步如何选定可逆反应。

4. 如果你使用 层流/有限速率，有限速率/涡耗散或是 EDC 模型模拟湍流-化学反应的相互作用，在 Arrhenius Rate 标题下输入 Arrhenius 速率的以下参数：

指数前因子（方程 13.1-9 中的常数A_r）。A_r的单位必须指定为方程 13.1-5 中的反应速率$\hat{R}_{i,r}$的单位，即 mol/vol*time（如 kgmol/m^3-s）和方程 13.1-5 中容积反应速率的单位，即质量/容积-时间（如 kg/ m^3-s）。!注意如果你选择了英制单位系统，Arrhenius 因子还是会按公制单位输入。这是因为当你使用英制单位时， **FLUENT** 没有对你的A_r输入使用转换因子，正确的转换因子依赖于你的$\nu'_{i,r}$，β_r等输入。

活化能（正向速率常数表达式中的常数 E_r，方程 13.1-9）。

温度指数（方程 13.1-9 中的常数 β_r）。

第三体效率（方程 13.1-8 中的 $\gamma_{j,r}$。如果你有这一效率的精确值，并且希望在反应速率中包括这种影响（即在方程 13.1-7 中包括 Γ），打开 **Third Body Efficiencies** 选项，并点击 **Specify…**按纽以打开 **Reaction Parameters** 面板（图 13.1.5)。对于面板中的每种物质，指定 **Third Body Efficiencies**。

！包括第三体效率不是必须的。你不需要选定 **Third Body Efficiencies** 选项，除非你有这些参数的精确值。

压力依赖反应（如果相关）如果你使用层流/有限速率，有限速率/涡耗散或是 EDC 模型模拟湍流-化学反应的相互作用，并且反应是压力下降反应（见 13.1.1 节），打开对于 **Arrhenius Rate** 的 **Pressure Dependent Reaction** 选项，并点击 **Specify…**按纽以打开 **Pressure Dependent Reaction** 面板（图 13.1.6）。欠松弛参数，选择适当的反应类型 Reaction Type（Lindemann,Troe,Sri）。这三种方法的细节见 13.1.1 节。然后，如果要将混合物的 **Bath Gas Concentration** 定义为一种混合物构成物质的浓度的话，你需要指定这一点，通过在下拉列表中选择适当的项。

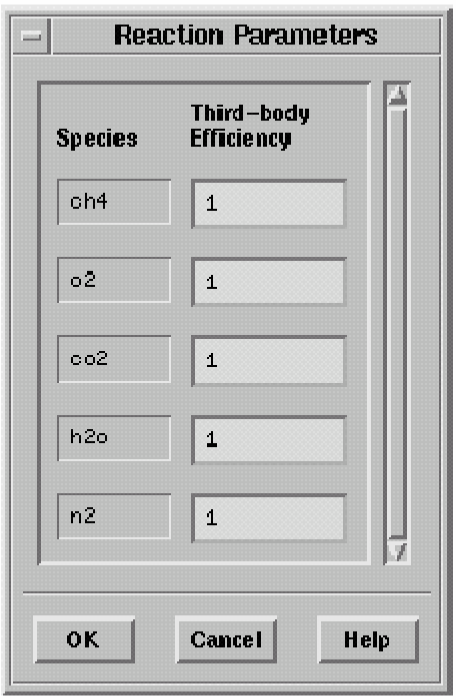


Figure 13.1.5: The Reaction Parameters Panel

在 **Reactions** 面板中 **Arrhenius Rate** 下指定的参数表示高压 **Arrhenius** 参数，但是你可以对 **Low Pressure Ahhrenius Rate** 下的以下参数指定值：

In（指数前因子）（方程 13.1-15 中的 A_{low}），指数前因子 A_{low} 常常是一个非常大的数，因此你需要这一项的自然对数值。

活化能（方程 13.1-15 中的 E_{low}）

温度指数（方程 13.1-15 中的 β_{low}）

如果你选择 **Troe** 作为反应类型，你可以在 **Troe Parameter** 下指定 Alpha,T1,T2,T3 的值（方程 13.1-22 中的α，T_1，T_2和T_3）。如果你选择 SRI 反应类型，你可以在 SRI Parameter 下指定 a,b,c,d,e 的值（方程 13.1-22 中的a，b，c，d和e）。

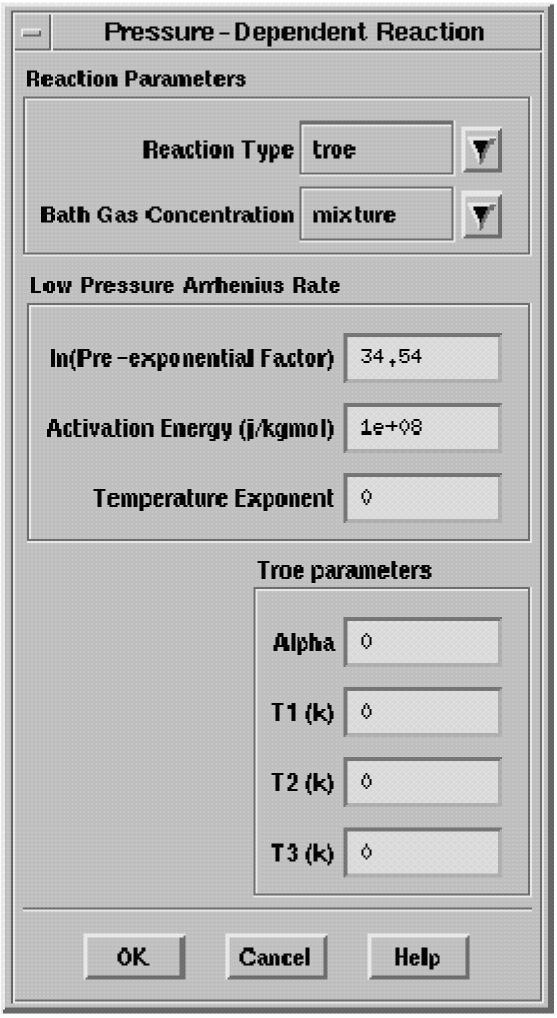


Figure 13.1.6: The Pressure-Dependent Reaction Panel

6．如果你使用层流/有限速率或是 EDC 模型模拟湍流-化学反应的相互作用，且反应是可逆的，则打开对于 **Arrhenius Rate** 的 **Include Backward Reaction** 选项。当选定这一选项时，你将不能编辑产物的 **Rate Exponent**，这些值将被设定为与相应的 Stoich.系数相等。如果你不希望使用 **FLUENT** 的缺省值，或者你在定义你自己的反应，你将还需要指定标准状态熵和标准状态焓，以在逆向反应速率常数计算中使用（方程 13.1-10）。注意可逆反应选项对于涡耗散或有限速率/涡耗散湍流-化学反应相互作用模型是不可获得的。

7．如果你使用湍流-化学反应相互作用的涡耗散或有限速率/涡耗散模型，你可以在 **Mixing Rate** 标题下输入 A 和 B 的值。但是注意除非你有可靠的数据，不要改变这些值/在大多数情况下，你只需要简单地使用缺省值。

A 是湍流混合速率的常数 A（方程 13.1-25 和 13.1-26），当一种物质作为反应物在反应中出现时用于这种物质。缺省值为 4.0，根据 Magnussen 等人给出的经验值[149]。

B 是湍流混合速率的常数 B（方程 13.1-25 和 13.1-26），当一种物质作为产物在反应中出现时用于这种

物质。缺省值为 0.5，根据 Magnussen 等人给出的经验值[149]。

8．对于每一种你需要定义的反应重复步骤 2-7。完成所有反应后，点 OK。

定义燃料混合物的物质和反应

经常会遇到这种情况，燃烧系统中的燃料不能用一种纯物质（例如 CH4 或 C2H6）来描述)。复杂的烃类，包括燃料油乃至木材片)，很难用这种纯物质来定义。但是，如果你已经得到了这种燃料的热值和最终分析（单元组成)，你可以定义一种等价的燃料物质和等价的热公式。例如，考虑一种含有 50%C，6%H 和 44%O（按重量）的燃料。除以原子质量后，你可以得到一种“燃料”物质，其分子式为 $C_{4.17}H_6O_{2.75}$。你可以从一种类似的，已存在的物质开始，或者从头开始创建一种物质，并分配给它一个分子量 100.04($4.17\times12+6\times1+2.75\times16$)。化学反应可以认为是：

$$C_{4.17}H_6O_{2.75} + 4.295O_2 \longrightarrow 4.17CO_2 + 3H_2O$$

你将需要对这一反应设定适当的 stoichiometric 系数。

燃料物质的燃烧热（或标准焓）可以从已知的热值 ΔH 计算得到，由于

$$\Delta H = \sum_{i=1}^{N} h_i^0 \left(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}\right) \qquad (13.1\text{-}31)$$

其中，h_i^0 是 1mol 的标准状态焓。注意方程 13.1-31 的符号约定：当反应为放热时，ΔH 为负。

定义混合物的物理属性

当你的 **FLUENT** 模型包括化学物质时，需要由你或数据库定义混合物材料的以下物理属性：

- 密度，可以用气体定律或作为组分比容的函数来定义
- 粘度，可以定义为组分的函数
- 热导率和比热（在涉及求解能量方程的问题中)，你可以定义为组分的函数
- 标准状态焓，如果你模拟可逆反应

这些属性输入的详细介绍在第 7 章中提供。

！包括一步和两步的总包反应机理不可避免地忽略中间物质。在高温火焰中，忽略这些分离物质可能会导致温度的过高预测。通过增加每种物质的比热容可以得到更理想的温度场。Rose 和 Cooper[252]提供了一组关于温度的比热多项式函数。每种物质的比热容可按下式计算：

$$c_p(T) = \sum_{k=0}^{m} a_k T^k \qquad (13.1\text{-}32)$$

表 13.1.1 为修正的 Cp 多项式系数

Table 13.1.1: Modified c_p Polynomial Coefficients [252]

	N_2	CH_4	CO	H_2
a_0	1.02705e+03	2.00500e+03	1.04669e+03	1.4147e+04
a_1	2.16182e−02	−6.81428e−01	−1.56841e−01	1.7372e−01
a_2	1.48638e−04	7.08589e−03	5.39904e−04	6.9e−04
a_3	−4.48421e−08	−4.71368e−06	−3.01061e−07	——
a_4	——	8.51317e−10	5.05048e−11	——
	CO_2	H_2O	O_2	
a_0	5.35446e+02	1.93780e+03	8.76317e+02	
a_1	1.27867e+00	−1.18077e+00	1.22828e−01	
a_2	−5.46776e−04	3.64357e−03	5.58304e−04	
a_3	−2.38224e−07	−2.86327e−06	−1.20247e−06	
a_4	1.89204e−10	7.59578e−10	1.14741e−09	
a_5	——	——	−5.12377e−13	
a_6	——	——	8.56597e−17	

13.1.5　定义物质边界条件

在你的模拟中，需要指定入口处每种物质的质量分数。另外，对于压力出口，你需要指定出口处的物质质量分数以在回流情况中使用。在壁面上，**FLUENT** 将对所有物质使用 0 梯度（0 通量）边界条件，除非你已经在壁面上定义了表面反应（见 13.2 节）或是你选择指定壁面上的物质质量分数。边界条件的输入在第 6 章论述。

！注意你只需要明确指定前 N-1 种物质的质量分数。求解器通过用 1 减去指定物质质量分数的和来计算最后一种物质的质量分数，如果你需要明确指定最后一种物质的质量分数，你必须在列表中（**Materials** 面板）记录这种物质，如 13.1.4 节所述。

进口处的扩散，使用非耦合求解器

正如 13.1.1 节中所提到的，当使用非耦合求解器时，没有指定入口处的物质扩散部分（因此也没有净入口输送量）。在某些情况下，你可能希望通过你的计算区域入口的只有物质的对流输送。你可以通过取消进口物质扩散做到这一点。在缺省状态下，**FLUENT** 在入口包括物质的扩散通量。为关闭入口扩散，使用 define/models/species-transport/inlet-diffusion? Text 命令。

13.1.6　定义化学物质的其他源项

你可以通过在 **Fluid** 面板中定义一个源项来在计算区域中定义一个化学物质的源或是容器。当你的问题中存在物质源，但你又不希望通过化学反应机理来模拟它的时候，可以选择这一方法。6.27 节叙述了在你的 **FLUENT** 模型中定义物质源所需要遵从的步骤。如果源项不是常数，你可以使用用户定义函数。用户定义函数的细节见单独的 UDF 手册。

13.1.7　化学混合和有限速率反应的求解步骤

尽管许多涉及化学物质的模拟在求解过程中不需要特殊的步骤，你可能发现本节中提供的一种或多种求解技术会对加速收敛或提高更复杂模拟的稳定性有所帮助。如果你的问题涉及许多物质和/或化学反应，尤其是模拟燃烧流动时，以下列出的技术可能特别重要。

反应流中的稳定性和收敛

在反应流中获得收敛解非常困难，有很多原因。首先，化学反应对基本流型的影响可能非常强烈，导致模型中质量/动量平衡和物质输运方程的强烈耦合。在燃烧中，反应导致大的热量释放和相应的密度变化以及流动中很大的加速度，上述耦合尤其明显。但是，当流动属性依赖于物质浓度时，所有的反应系统都具有一定程度的耦合。处理这些耦合问题的最好方法是使用下面介绍的两步求解过程及使用 22.9 节中介绍

的欠松弛方法。

反应流中的第二个收敛问题涉及反应源项的强度。当你的 FLUENT 模型涉及非常快的反应速率（即比对流和扩散速率快得多），物质输运方程的求解在数值上非常困难。这种系统称为“刚性”系统，当你定义涉及非常快的动力速度的模型，尤其是这些速度描述可逆反应或竞争反应，这种系统得以创建。在涡耗散模型中，较慢的湍流速率去除了非常快的反应速率。对非预混系统，反应速率从模型中去除。对于层流化学反应的刚性系统，推荐使用耦合求解器代替非耦合求解器。对湍流有限速率机理（可能是刚性的），推荐使用 EDC 模型，这一模型对化学反应使用一个刚性的 ODE 积分器。求解刚性化学反应系统的其它指南见下述内容。

两步求解过程（冷流动模拟）

将一个反应流动作为两步过程求解对于获得你的 FLUENT 问题的稳定收敛解是一个实用的方法。在这一过程中，你从求解不带反应的流动、能量和物质方程（“冷流动”，或无反应流动）开始。当建立基本的流型后，你可以再选择反应，并重新开始计算。冷流动求解提供了燃烧系统计算的初始解。这种燃烧模拟的两步方法可以采用以下步骤完成：

1. 设定包括所有感兴趣物质和反应的问题
2. 通过关闭 **Species Model** 面板中的 **Volumetric Reactions** 选项暂时不选择反应计算

   Define ⟶ Models ⟶ Species...

3. 关闭 **Solution Controls** 面板中的产物计算

   Solve ⟶ Controls ⟶ Solution...

4. 计算初始解（冷流动）。（注意通常获得完全收敛的冷流动解没有实际价值，除非你对无反应解也有兴趣）
5. 打开 **Species Model** 面板中的 **Volumetric Reactions** 选项使能反应计算
6. 打开所有反应。如果你使用层流有限速率、有限速率/涡耗散，或是 EDC 模型模拟湍流-化学反应相互作用，你可能需要增添一个点火源（如下所述）。

密度欠松弛

燃烧模拟难以收敛的一个主要原因是温度的剧烈变化引起密度的剧烈变化，从而导师流动求解的不稳定性。当你使用非耦合求解器时，**FLUENT** 允许你欠松弛密度的这种变化以降低收敛的困难。密度欠松弛因子的缺省值为 1，如果你遇到收敛问题，你可以将这个值减少到 0.5 到 1 之间（在 **Solution Controls** 面板中）。

燃烧模拟的点火

如果你将燃料引入氧化剂，自发的点火不会发生，除非混合物的温度超过了维持燃烧所需要的活化能阈值。这一物理问题在 FLUENT 中也会出现。如果你使用层流有限速率、有限速率/涡耗散或 EDC 模型模拟湍流-化学反应相互作用，你将不得不提供一个点火源以启动燃烧。这个点火源可以是加热的表面或温度超过点火温度的入口质量流。但是，这常常等同于一个火花：一个初始求解状态使得燃烧可以进行。你可以通过在 FLUENT 模型中一个包含有足够燃料/空气混合物以使点火能发生的区域给一个高的温度，来提供这个初始火花。

Solve ⟶ Initialize ⟶ Patch...

根据模型的不同，你可能需要提供温度和燃料/氧化剂/产物浓度以在你的模型中产生点火。点火。这种补缀对于最终的稳态解没有影响——不超过火柴的位置对它点燃的火炬最终流型的影响。缀入初始值的细节见 22.13.2 节。

刚性层流化学反应系统的求解

当使用层流有限速率模型模拟层流反应系统时，你可能需要在反应机理是刚性的时候使用耦合求解器。

（反应流中的求解收敛 问题见以上讨论。注意你可以对湍流火焰使用层流有限速率模型，这表示忽略湍流-化学反应的相互作用。）另外，你可以通过使用 stiff-chemistry 文本命令为耦合求解器提供进一步的求解稳定性。

solve → set → stiff-chemistry

这一选项对于大 Courant(CFL)数特例也适合，尽管需要额外的运算来计算化学雅可比行列式的特征值[258]。当你使能刚性化学反应求解器时，你将会被询问指定下列参数：

- 温度的正性速率限制：以这个因子乘旧的温度限制新的温度改变。缺省值为 0.2。
- 温度时间步长减少因子：当温度变化过快时限制当地 CFL 数。缺省值为 0.25。
- 最大允许时间步长/化学反应时间尺度的比值：当化学反应时间尺度（化学雅可比行列式的特征值）过大时限制当地 CFL 数，以保持好条件矩阵。缺省值为 0.9。

这些缺省值在大多数实例中都是可用的。

注意 **stiff-chemistry** 选项对非耦合求解器是没有的；它只能用于耦合求解器（隐式的或显式的）。

EDC 模型求解步骤

如果你使用 EDC 模型，推荐使用双精度求解器（见 1.5 节），以避免刚性机理中固有的大指数前因子和活化能产生的截断误差。

由于 EDC 模型需要很大的计算开销，建议你采用以下步骤，以用非耦合求解器得到解：

1. 用涡耗散模型和简单的单步或两步放热机理计算一个初始解。
2. 用适当的物质使能 EDC 化学反应机理。如果你有一个 **CHEMKIN**[112]格式的机理，参见 13.1.9 如何将它导入。
3. 如果物质的数目和反应顺序改变，你将需要改变物质边界条件。

   Define → Boundary Conditions...

4. 通过关闭 Species Model 面板中的 **Volumetric Reaction** 选项暂时取消反应计算。

   Define → Models → Species...

5. 在 Solution Controls 面板中只使能物质方程的求解。

   Solve → Controls → Solution...

6. 对物质混合场计算一个解。
7. 打开 **Species Model** 面板中的 **Volumetric Reaction** 选项，选定反应计算，并在 Turbulence-Chemistry Interaction 下选择 EDC 模型。
8. 在 **Solution Controls** 面板中使能 **Energy** 方程的求解。
9. 对复合了物质和温度的场计算一个解。如果火焰吹熄，你可能还需要补缀一个高温区域。
10. 打开所有方程。
11. 计算最终解。

13.1.8 物质计算的后处理

FLUENT 可以报告化学物质的质量分数、摩尔分数和摩尔浓度。你还可以显示层流和有效质量扩散系数。物质输运和反应模拟的后处理可以得到以下变量：

- 物质 n 的质量分数
- 物质 n 的摩尔分数
- 物质 n 的浓度
- 物质 n 的的层流扩散系数

- 物质 n 的有效扩散系数
- 物质 n 的的焓（仅对非耦合求解器）
- 物质 n 的源项（仅对非耦合求解器）
- 物质 n 的表面沉积速率（只对颗粒表面反应计算）
- 相对湿度
- 时间步长尺度（只对刚性化学反应求解器）
-
    - Fine Scale Mass fraction of species-n (EDC model only)
    - Fine Scale Transfer Rate (EDC model only)
    - 1-Fine Scale Volume Fraction (EDC model only)
    - Fine Scale Temperature (EDC model only)
- 反应 n 的速率
- 反应 n 的 Arrhenius 速率
- 反应 n 的湍流速率

这些变量包含在后处理面板的变量选择下拉列表中的 **Species…**，**Temperature…**，和 **Reactions…**栏中。完整的流动变量、场函数和它们的定义见 27 章，25、26 章解释了如何产生图形显示和数据报告。

平均物质浓度

使用 Surface Integrals 面板，可以得到模型中的入口、出口和选择面（即用 Surface 菜单项创建的表面）上的平均浓度。

Report → Surface Integrals...

在 **Field Variable** 下拉列表中选择适当物质的 **Concentration of species-n**。

13.1.9 从 CHEMKIN 导入一个化学反应机理

如果你有一个 CHEMKIN 格式的气相化学反应机理，你可以使用 **Chemkin Import** 面板（图 13.1.7）将机理文件导入 FLUENT。

File → Import → Chemkin...

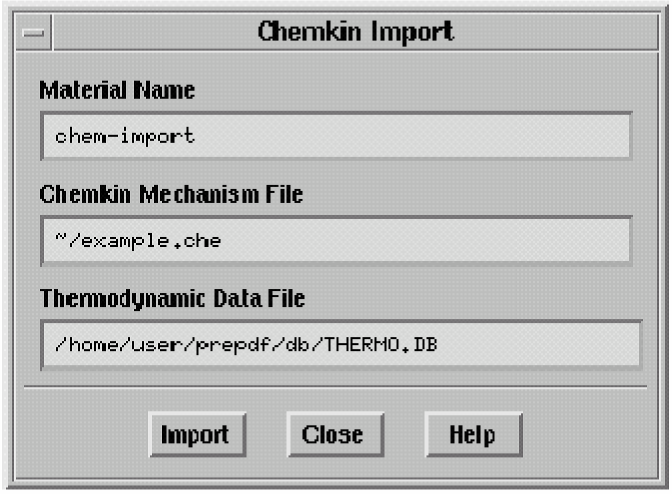


Figure 13.1.7: The Chemkin Import Panel

在 **Chemkin Import** 面板中，在 **Chemkin Mechanism Flie** 下输入 CHEMKIN 文件的路径（如路径/file.che），并指定 **Thermodynamic Data File(THERMO.DB)**的位置。有关数据库的更多信息见 14.3.1 节。

当你指定了两个文件的正确路径后，在 **Material Name** 下输入化学反应机理的名字，并点击 **Import** 按纽。FLUENT 将以这个指定的名字创建一个种材料，它将包含物质和反应的 **CHEMKIN** 数据，并且将加到 Material 面板中的可得到 **Mixture Materials** 中去。

13.2　壁面表面反应和化学蒸汽沉积

对于气相反应，反应速率是在容积反应的基础上定义的，化学物质的形成和摧毁成为物质守恒方程中的一个源项。沉积的速率由化学反应动力和流体到表面的扩散速率控制。壁面表面反应因此在丰富相中创建了化学物质的源（和容器），并决定了表面物质的沉积速率。

有关表面反应和化学蒸气沉积的信息按以下小节给出：

- 13.2.1　概述和限制
- 13.2.2　理论
- 13.2.3　壁面表面反应的用户输入
- 13.2.4　壁面表面反应的求解过程
- 13.2.5　壁面表面反应的后处理

13.2.1　概述和限制

表面物质和壁面表面反应的概述

FLUENT 把沉积在表面的化学物质与气体中的相同化学物质分开处理。类似地，涉及沉积的表面反应定义为单独的表面反应，因而其处理也与涉及相同化学物质的丰富相反应不同。举例说明，考虑从硅烷分解的如下硅沉积机理：

反应 1（表面）：$SiH_4(g) \rightarrow Si(s) + 2H_2(g)$；

反应 2（气体）：$SiH_4(g) \rightarrow SiH_2(g) + H_2(g)$；

反应 3（气体）：$SiH_2(g) \rightarrow Si(g) + H_2(g)$；

反应 4（表面）：$SiH_2(g) \rightarrow Si(s) + H_2(g)$；

反应 5（表面）：$Si(g) \rightarrow Si(s)$；

在这一反应体系中，$Si(s)$ 和 $Si(g)$ 作为两中不同的物质处理，你将需要分别定义。与气相物质相比，表面物质（如 $Si(s)$）在流体相中不存在，不求解它们的质量守恒方程。FLUENT 将预测每种表面物质的质量沉积速率。类似地，反应 3 和反应 4 也定义为两种不同的反应。你将定义每种反应为发生在流体相（反应 3）或是发生在选择的与流体相邻的表面（反应 4）。注意表面反应可能会被限制发生在某些壁面边界（而其它壁面边界保持不发生表面反应）。最后，表面反应是以单位面积来定义和计算的，而流体相反应基于单位容积。

限制

表面反应采用的连续方法在高 Knudsen 数（非常低压力下的流动）下不适用。

13.2.2 理论

壁面表面反应的 Arrhenius 反应速率

考虑如下的写为通用形式的第 r 个壁面表面反应：

$$\sum_{i=1}^{N} \nu'_{i,r} \mathcal{M}_i \overset{k_{f,r}}{\rightarrow} \sum_{i=1}^{N} \nu''_{i,r} \mathcal{M}_i \qquad (13.2\text{-}1)$$

其中，N -系统中总的化学物质数目

$\nu'_{i,r}$ -反应 r 中反应物 I 的化学计量系数

$\nu''_{i,r}$ -反应 r 中产物 I 的化学计量系数

M_i -物质 I 的记号

$k_{f,r}$ -反应 r 的正向速率常数

方程 13.2-1 中的和是针对系统中的所有化学物质，但只是那些具有非零化学计量系数的反应物和产物。因此，不涉及的物质将在方程中去除。

反应 r 中物质 I 的产生/摧毁摩尔速率（方程 13.1-5 中的 $\hat{R}_{i,r}$）由下式控制：

$$\hat{R}_{i,r} = \left(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}\right) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} \right) \qquad (13.2\text{-}2)$$

其中，N_r -反应 r 中的化学物质数目

$C_{j,r}$ -反应 r 中每个反应物和产物 j 的摩尔浓度（kgmol/m^3）

$\eta'_{j,r}$ -反应 r 中每个反应物和产物 j 的正向反应指数

反应 r 的正向反应常数 $k_{j,r}$ 按 Arrhenius 公式计算：

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \qquad (13.2\text{-}3)$$

其中，A_r -指数前因子（恒定单位）

β_r -温度指数（无维）

E_r -反应活化能（j/kmol）

R -通用气体常数（j/koml-K）

你（或数据库）需要提供$\nu'_{i,r}$，$\nu''_{i,r}$，$\eta'_{j,r}$，β_r，A_r和E_r的值。

壁面表面反应边界条件

对于壁面表面边界条件，反应表面的物质浓度计算基于进入（或离开）表面的每种物质的对流和扩散平衡，以及它在表面消耗（或产生）的速率。物质 I 的这种通量平衡可以记为：

$$\vec{J}_i \cdot \vec{n} - \dot{m}_{\mathrm{dep}} Y_{i,\mathrm{wall}} = R''_i \qquad (13.2\text{-}4)$$

其中，$\vec{n}$ 为垂直于表面的单位矢量；

$\vec{J}_t$ 为物质 i 的扩散通量；

R''_i 为由于表面反应的物质 i 产生速率；

$\dot{m}_{dep}$ 为总的质量沉积速率；

$Y_{i,wall}$ 为壁面上物质 i 的质量分数

用方程 13.2-4 可以得到壁面处物质 i 的质量分数和单位面积物质 i 的净产生速率的表达式。这些表达式在 **FLUENT** 中用来计算反应表面处的气相物质浓度，采用点对点耦合刚性求解器。

在连续性中包括进入表面的质量输运

在以上所述的表面反应边界条件中，壁面法向速度的影响或输运到壁面的丰富相质量没有包括在物质输运的计算之中。离开表面的净质量通量的动量也忽略掉了，由于这一动量和邻近表面单元里的流动动量相比通常很小。但是，你可以通过激活 **Species Model** 面板中的 **Mass Deposition Source** 选项，在连续性方程中包括表面质量输运的影响。

能量方程中的壁面表面质量输运影响

能量方程中由于壁面表面反应产生的物质扩散影响包含在 13.1.1 节所述的正常物质扩散项中。

如果你使用非耦合求解器，可以通过关闭 **Species Model** 面板中的 **Diffusion Energy Source** 选项忽略掉这一项。（对耦合求解器，通常是包括这一项的；你不能关闭）忽略物质扩散项意味着在涉及带有显著热容差异的物质混合，尤其是对带有 Lewis 数远大于 1 的物质的问题中，可能会对温度预测带来误差。当 Le=1 时物质扩散的影响应为零，你可能会发现由于物质和能量方程中数值积分的差异而产生微妙的影响。

模拟壁面表面反应产生的放热

缺省时，**FLUENT** 忽略壁面表面反应产生的放热。但你可以通过激活 **Species Model** 面板中的 **Heat of Surface Reactions** 选项，并设定 **Materials** 面板中的生成焓来选择包含表面反应的热量。

13.2.3　壁面反应的用户输入

设置一个涉及壁面反应问题的基本步骤与 13.1.2 节中所述的设置一个只有气相反应的问题大致相同，

但有一些额外的设置：

1．在 **Species Model** 面板中：

Define → Models → Species...

（a） 使能 **Species Transport**，选择 **Reactions** 下的 **Volumetric** 和 **Wall Surface**，并指定 **Mixture Material**。这一过程的细节见 13.1.3 节及 13.1.2 节关于混合物材料概念的解释。

（b） （可选）如果希望模拟壁面反应的放热，打开 **Heat of Surface Reactions** 选项。

（c） （可选）如果希望在连续性方程中包括表面质量输运的影响，打开 **Mass Deposition Source** 选项。

（d） （可选）如果使用非耦合求解器，并且不希望在能量方程中包括物质扩散的影响，关闭 **Diffusion Energy Source** 选项。细节见 13.2.2 节。

（e） （可选，但对 CVD 推荐）如果希望模拟完整的多组分扩散或热扩散，打开 Full **Multicomponent Diffusion** 或 **Thermal Diffusion** 选项。细节见 7.7.2 节。

2．检查和/或定义混合物属性（见 13.1.4 节）：

Define → Materials...

混合物属性包括：

- 混合物中的物质
- 反应
- 其他物理属性（如粘度，比热）

！你将在 **Fluid Materials** 列表中找到所有物质（包括表面物质）。对于象 Si 一类的物质，你可以在流体材料类型的材料列表中找到 Si(g)和 Si(s)。如果你在模拟 13.2.1 节开始处实例中的硅沉积反应，你将需要在混合物中包括两中 Si 元素（气体和固体）。

！注意如果你的模型中包括稀释混合物中的物质，**Selectecd Species** 列表中的最终气相物质必须是载体气体。（因为 **FLUENT** 不会求解最后物质的输运方程。）还需要注意的是任何物质的重排、增减都必须小心处理，如 13.1.4 节所述。

3．检查和/或设定混合物中单独物质的属性（见 13.1.4 节）。注意如果你模拟表面反应的放热，你必须检查（或定义）每种物质的生成焓。

4．设置物质边界条件

Define → Boundary Conditions...

除了 13.1.5 节中所述的边界条件之外，你还需要指定表面反应对每个壁面是否有效，并考虑热边界条件的选择。为使能一个壁面上的表面反应影响，在 Wall 面板的 Species 区域打开 Surface Reactions 选项。壁面的边界条件输入细节见 6.13.1 节。

！当在一个给定壁面使能表面反应后，这一壁面上对混合物材料定义的所有表面反应都被激活。

13.2.4 壁面反应的求解过程

正如所有的 CFD 模拟一样，如果模拟从一个简单的问题描述开始，在求解向前推进时增加复杂性，可能会使你的表面反应模拟工作更加成功。对于表面反应，你可以遵从 13.1.7 节中对流体相反应给出的指南。

另外，如果你模拟表面反应的放热，而且遇到了收敛性方面的麻烦，你可以尝试暂时关闭 Species Model 面板中的 **Surface reactions** 和 **Mass Deposition Source** 选项 4。

13.2.5 表面反应的后处理

对壁面反应，除了 13.1.8 节中列出的变量之外，你还可以显示/报告沉积在一个表面上的固体物质的沉积速率。在变量选择下拉列表中的 **Species…**栏中选择物质 n 的 **Surface Deposition Rate** 。

13.3 颗粒表面反应

如 19.3.6 节所述的，可以定义多颗粒表面反应以模拟离散相颗粒的表面燃烧。颗粒表面反应的信息按以下小节给出：

- 13.3.1 理论
- 13.3.2 颗粒表面反应的用户输入
- 13.3.3 使用离散相颗粒燃烧的多表面反应

13.3.1 理论

一般描述

Smith 提出了计算碳粒燃烧速率的关系，并进行了详细讨论[218]。颗粒反应速率 R 可以表示为：

$$\mathcal{R} = D_0(C_g - C_s) = R_c(C_s)^N \qquad (13.3\text{-}1)$$

其中，D_0 -bulk 扩散系数；

C_g 大量物质中的平均反应气体物质浓度（kg/m^3）；

C_s 颗粒表面的平均反应气体物质浓度（kg/m^3）

R_c 化学反应速率系数；

N -显式反应级数（无维）；

在方程 13.3-1 中，颗粒表面处的浓度 C_s 是未知的，因此需要消掉，表达式改写为如下形式：

$$\mathcal{R} = R_c\left[C_g - \frac{\mathcal{R}}{D_0}\right]^N \qquad (13.3\text{-}2)$$

这一方程需要通过一个迭代过程求解，除去 $N=1$ 或 $N=0$ 的特例。当 $N=1$ 时，方程 13.3-2 可以写为：

$$\mathcal{R} = \frac{C_g R_c D_0}{D_0 + R_c} \qquad (13.3\text{-}3)$$

在 $N=0$ 情况下，如果在颗粒表面具有有限的反应物浓度，固体损耗速度等于化学反应的速度。如果在表面没有反应物，固体损耗速度根据扩散控制速率突然变化。在这种情况下，处于稳定性的原因，**FLUENT** 采用化学反应速率。

FLUENT 模型形式

图 13.3.1 表示了一个正在气相中进行放热反应的颗粒。T_p 和 T_∞ 是方程 19.3-78 中的温度。

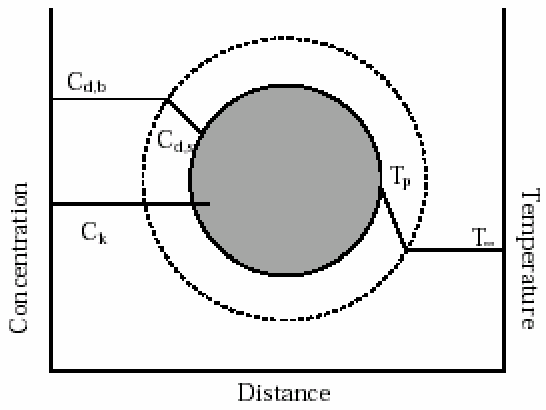


Figure 13.3.1: A Reacting Particle in the Multiple Surface Reactions Model

基于以上分析，FLUENT 用以下方程表示在气相物质 n 中颗粒表面物质 i 的第 r 个反应的速率。在这中情况下，反应 r 的化学计量表达式描述为

$$\text{particle species } j(s) + \text{gas phase species } n \rightarrow \text{products}$$

反应的速率为：

$$\overline{\mathcal{R}}_{j,r} = A_p \eta_r Y_j \mathcal{R}_{j,r} \tag{13.3-4}$$

$$\mathcal{R}_{j,r} = \mathcal{R}_{\mathrm{kin},r} \left(p_n - \frac{\mathcal{R}_{j,r}}{D_{0,r}} \right)^{N_r} \tag{13.3-5}$$

其中，$\overline{R}_{j,r}$ -颗粒表面物质的消耗速率（kg/s）；

A_p -颗粒表面积（m^2）；

Y_j -颗粒状态的表面物质 j 的质量分数；

η_r -效率因子（无维）；

$R_{j,r}$ -单位面积的颗粒表面物质反应速率（kg/m^2-s）；

p_n -气相物质的分压力（Pa）；

$D_{0,r}$ -反应 r 的扩散速率系数

$R_{kin,r}$ -反应 r 的动力学速率（单位变化）；

N_r -反应 r 的显式级数

效率因子 η_r 与表面积有关，可以用于多反应例子中的每一个反应。$D_{0,r}$ 由下式给出：

$$D_{0,r} = C_{1,r}\frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \qquad (13.3\text{-}6)$$

反应 r 的动力学速率定义为：

$$\mathcal{R}_{\mathrm{kin},r} = A_r T^{\beta_r} e^{-(E_r/RT)} \qquad (13.3\text{-}7)$$

反应级数 $N_r = 1$ 的颗粒表面物质消耗速率由下式给出：

$$\overline{\mathcal{R}}_{j,r} = A_p \eta_r Y_j p_n \frac{\mathcal{R}_{\mathrm{kin},r} D_{0,r}}{D_{0,r} + \mathcal{R}_{\mathrm{kin},r}} \qquad (13.3\text{-}8)$$

反应级数 $N_r = 0$ 时，

$$\overline{\mathcal{R}}_{j,r} = A_p \eta_r Y_j \mathcal{R}_{\mathrm{kin},r} \qquad (13.3\text{-}9)$$

多气相反应物的化学表达式扩展

当有超过一种气相反应物参与到反应中时，反应的表达式需要扩展：

$$\text{particle species } j(s) + \text{gas phase species } 1 + \text{gas phase species } 2 + \ \ldots$$
$$+ \text{ gas phase species } n_{\max} \rightarrow \text{products}$$

为表示有 n_{max} 种气相物质出现的反应中某种颗粒表面物质 j 的第 r 个反应的速率，需要对每种固体颗粒反应定义扩散限制的物质，即在载体和颗粒表面之间浓度梯度最大的物质。对其它物质，表面和载体浓度认为相等。扩散限制物质的浓度在图 13.3.1 中一$C_{d,b}$和$C_{d,s}$表示，其它物质的浓度记为C_k。对多气相反应物的化学表达式，方程 13.3-4 和 13.3-8 中的载体分压力 p_n 就是反应 r 中扩散限制物质的大量分压力 $p_{r,d}$。

反应 r 的动力学速率定义为：

$$\mathcal{R}_{\mathrm{kin},r} = \frac{A_r T^{\beta_r} e^{-(E_r/RT)}}{(p_{r,d})^{N_{r,d}}} \prod_{n=1}^{n_{\max}} p_n^{N_{r,n}} \qquad (13.3\text{-}10)$$

其中， p_n -气体物质 n 的大量分压力

$N_{r,n}$ -物质 n 的反应级数。

当选定这一模型后，常数$C_{1,r}$（方程 13.3-6）和 效率因子η_r（方程 13.3-4）在 **Reactions** 面板中输入，如 13.3.2 节所述。

13.3.2 颗粒表面反应的用户输入

颗粒表面反应的输入过程只需要在 13.1.2 节-13.1.6 节介绍的容积反应过程的基础上增加一些输入即可。这些附加的输入如下：

- 在 **Species Model** 面板，打开 **Reactions** 下的 **Particle Surface** 选项。

Define → Models → Species...

- 当你指定颗粒表面反应中涉及的物质时，确保确定表面物质，如 13.1.4 节所述。

！ 你将在 **Fluid Materials** 列表中找到所有的物质（包括表面物质）。例如，如果你模拟煤气化，你可以在流体材料类型的材料列表中找到固态碳 $C(s)$ 。

- 对每一种颗粒表面反应，在 **Reactions** 面板中选择 **Reaction Type** 为 **Particle Surface**，并指定以下参数（除了 13.1.4 节所述的之外）：

  扩散限制物质：当有超过一种的气相反应物参与颗粒表面反应时，扩散限制物质是在载体和颗粒表面反应之间浓度梯度最大的物质。这一概念的描述见 13.3.1 节。在大多数情况下，只有一种气相反应物，扩散限制物质没有必要定义。

  扩散速率常数：方程 13.3-6 中的 $C_{1,r}$

  效率因子：方程 13.3-4 中的 η_r

13.3.3 对离散相颗粒燃烧使用多表面反应模型

当你使用多表面反应模型时，设定一个涉及离散相问题的过程与 19.6 节概括的过程稍有不同。修正的过程如下：

1． 使能所有相关的离散相模拟选项，如 19.7 节所述。
2． 指定初始条件，如 19.9 节所述。
3． 定义边界条件，如 19.10 节所述。
4． 定义材料属性，如 19.11 节所述。

！在进入下一步之前，先需要在 **Materials** 面板中的 **Combustion Model** 下拉列表中选择 **multi-surface-reactions**。

5． 如果你已经定义了超过一种颗粒表面物质，如碳（$C\langle s\rangle$）和硫（$S\langle s\rangle$），你需要返回到 **Set Injection Properties** 面板（或 **Set Multiple Injection Properties** 面板），指定燃烧颗粒中每种颗粒表面物质的质量分数。点击 **Multiple Reactions** 表格，并输入 **Species Mass Fractions**。这些质量分数指的是燃烧颗粒中的可燃组分，和必须为 1。如果混合物材料中只有一种表面物质，这种物质的质量分数将被设定为 1，你不需要在 **Multiple Surface Reactions** 下指定任何东西。
6． 求解参数并求解问题，如 19.12 节所述。
7． 检查结果，如 19.13 节所述。

！ 当使用多表面反应模型时，不能进行非稳态粒子追踪。

13.4 无反应的物质输运

除了上述的容积和表面反应之外，你还可以用 FLUENT 求解无反应的物质混合问题。**FLUENT** 要求解的物质输运方程在 13.1.1 节中已经介绍，设定无反应物质输运问题的过程与 13.1.2-13.1.6 节中所述的过程相同，某些地方有所简化。

基本步骤如下所列：

1．在 **Species Model** 面板中选定 **Species Transport**，并选择适当的混合物材料。

Define → Models → Species...

有关混合物材料的概念见 13.1.2 节，使用 **Species Model** 面板的更多细节见 13.1.3 节。

2．（可选）如果你希望模拟完全多组分扩散或热扩散，打开 **Full Multicomponent** 或 **Thermal Diffusion**

选项。细节见 7.7.2 节。

3．检查和/或定义混合物的属性及其构成物质。

Define → Materials...

混合物属性包括：

- 混合物中的物质
- 其他物理属性（如粘度、比热）

细节见 13.1.4 节。

4．设定边界条件，如 13.1.5 节所述。

无反应的物质输运一般不需要特殊的求解过程。计算完成后，你可以显示或报告以下量：

- 物质 n 的质量分数
- 物质 n 的摩尔分数
- 物质 n 的浓度
- 物质 n 的的层流扩散系数
- 物质 n 的有效扩散系数
- 物质 n 的的焓（仅对非耦合求解器）
- 相对湿度

这些变量包含在后处理面板中出现的变量选择下拉列表中的 **Species…**栏。流动变量、场函数及其定义的完整列表见 27 章。25 章和 26 章解释如何产生图形显示和数据报告。

第十四章 非预混燃烧模拟

Chapter 14. Modeling Non-Premixed Combustion

在非预混燃烧中，燃料和氧化剂以相异流进入反应区。这与预混燃烧系统截然不同。在预混燃烧系统中，反应物在燃烧以前以分子水平混合。非预混燃烧的例子包括甲烷燃烧、粉煤炉和内部燃烧柴油（压缩）发动机。

在一定假设条件下，热化学可被减少成一个单一的参数：混合分数。混合分数，用 *f* 表示，是来自燃料流的质量分数。换句话说，混合分数就是在所有组分（CO_2、H_2O、O_2 等）里，燃烧和未燃烧燃料流元素（C、H 等）的局部质量分数。因为化学反应中元素是守恒的，所以这种方法极好。反过来，质量分数是一个守恒的数量，因此其控制输运方程不含源项。燃烧被简化为一个混合问题，并且与近非线性平均反应率相关的困难可以避免。一经混合，即可用层流小火焰（laminar flamelet）模型将化学反应模拟成为化学平衡或近化学平衡。

模型包括以下几个部分：

14.1：平衡混合分数／PDF模型（Description of the Equilibrium Mixture Fraction/PDF Model）；

14.2：非预混平衡化学反应的模拟方法（Modeling Approaches for Non-Premixed Equilibrium Chemistry）；

14.3：非预混平衡模型的用户输入（User Inputs for the Non-Premixed Equilibrium Model）；

14.4：层流小火焰模型（The Laminar Flamelet Model）；

14.5：在prePDF数据库中添加新种类（Adding New Species to the prePDF Database）；

14.1：平衡混合分数／PDF模型

非预混模拟方法包括解一或两个守恒量（混合分数）的输运方程。不解单个组分方程。取而代之的是每个组分的浓度用预混分数场得到。热化学计算在prePDF中进行，并列成表以便于在FLUENT中查询。紊流和化学的相互作用考虑为一个概率（几率）密度函数（PDF）。

关于非预混混合分数／PDF模型的信息在以下分节中讲述：

14.1.1：非预混方法的优点和局限（Benefits and Limitations of the Non-Premixed Approach）；

14.1.2：非预混方法的细节（Details of the Non-Premixed Approach）；

14.1.3：非预混模拟的限制和特有案例（Restrictions and Special Cases for Non-Premixed Modeling）；

见14.2：模拟和解决顺序的回顾，以及14.3：应用模型指导。

14.1.1非预混方法的优点和局限

非预混方法的优点（Advantages of the Non-Premixed Approach）：

非预混模拟方法已被明确用于模拟进行快速化学反应的紊态扩散火焰的研究。对这样的系统，该方法有许多点优于第十三章中描述的有限率公式。非预混

模型允许预测中间（基本）组分、溶解效应和严格的紊流化学耦合。因为不需要解大量的组分输运方程，该方法在计算上很有效。当潜在的假设有效时，非预混方法要优先于有限率公式。

非预混方法的局限（Limitations of the Non-Premixed Approach）：

如14.1.2节，非预混方法仅能用于当反应流动系统满足几个要求时。第一、流动是湍流。第二、反应系统包括一个燃料流、一个氧化剂流，并且随意包括一个次要流（另外一个燃料或氧化剂，或者一个非反应流）。最后、化学动力学必须迅速以使流动接近化学平衡。这些点详见14.1.2和14.1.3节。

！注意：非预混模型仅能与分离求解器使用，不能与耦合求解器使用。

14.1.2 非预混方法细节（Details of the Non-Premixed Approach）

定义混合分数（Definition of the Mixture Fraction）

非预混模拟方法的基础为在一定系列简化假设下，流体的瞬时热化学状态与一个守恒量，即混合分数*f*相关。混合分数可根据原子质量分数［213］写为：

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \qquad (14.1\text{-}1)$$

式中：Z_i——元素*i*的元素质量分数。下标*ox*表示氧化剂流入口处的值，*fuel*表示燃料流入口处的值。如果所有组分的扩散系数相等，式14.1-1对所有元素都是相同且混合分数定义是唯一的。因此，混合分数就是由来源于燃料流的元素质量分数。注：这个质量分数包括所有来自燃料流的元素，包括惰性组分，N_2，也包括与燃料混合的氧化性组分，如O_2。

如果包括次要流（另一种燃料或氧化剂，或一种非反应流），燃料和次要流混合分数简化为燃料和次要流的质量分数。系统中这三种质量分数的和总是等于1：

$$f_{fuel} + f_{sec} + f_{OX} = 1 \qquad （14.1－2）$$

这表明在混合分数空间中只有在平面ABC（见图14.1.1）上的点有效。因此，这两个混合分数，f_{fuel}和f_{sec}不能独立变化；他们的值仅在如果他们位于图14.1.2所示三角形OBC里面时才有效。

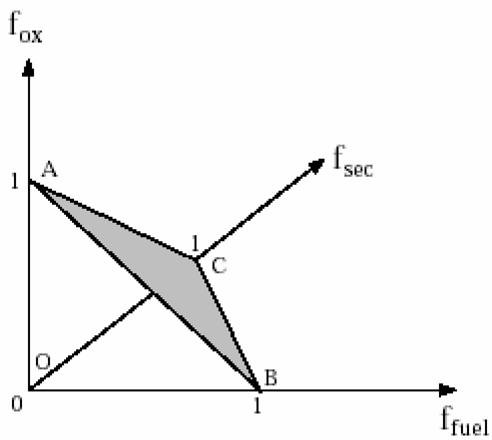


图14.1.1：f_{fuel}，f_{sec}和f_{ox}的关系

Figure 14.1.1: Relationship of *ffuel*, *fsec*, and *fox*

FLUENT离散三角形OBC如图14.1.2所示。特别地，对于单一混合分数情形，

原始混合分数f_{fuel}允许在0到1值见变化，当次要混合分数位于线上时，用下列方程：

$$f_{sec} = p_{sec} \times (1 - f_{fuel}) \qquad (14.1-3)$$

式中：p_{sec}——标准次要混合分数，为直线与次要混合分数轴交叉点处的值。

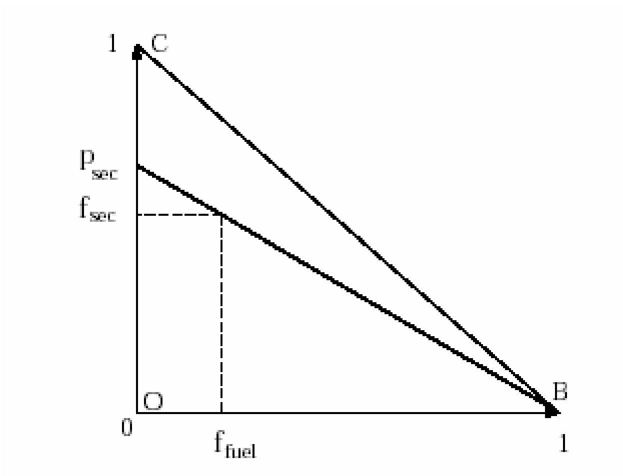


图14.1.2 f_{fuel}, f_{sec}, and p_{sec}之间的关系

Figure 14.1.2: Relationship of f_{fuel}, f_{sec}, and p_{sec}

注：不像f_{sec}，p_{sec}限制在0到1之间，与f_{fuel}的值无关。

标准次要质量分数p_{sec}的一个重要特征就是假设其与燃料质量分数f_{fuel}统计独立性。注：不像f_{sec}，p_{sec}是一守恒的标量。除了根据f_{sec}为一个次燃料流定义富限时，第二个标量变量的标准混合分数定义可用与任何地方。

混合分数的输运方程（Transport Equations for the Mixture Fraction）：

在相同扩散率的假设下，组分方程可被减少为一个单一的关于混合组分f的方程。由于删去了组分方程中的反应源项，因此f是一个守恒量。由于相同扩散率的假设对层流流动来说还存在疑问，因此对于紊态对流超过分子扩散的湍流通常是可接受的。平均（时间平均）混合分数方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \qquad (14.1-4)$$

源项S_m仅指质量由液体燃料滴或反应颗粒（如煤）传入气相中。S_{user}为任何用户定义源项。

除了解平均混合分数，FLUENT也解一个关于平均混合分数均方值的守恒方程$\overline{f'^2}$［105］：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \overline{f'^2}\right) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v}\, \overline{f'^2}\right) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t \left(\nabla^2 \bar{f}\right) - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} + S_{user} \qquad (14.1-5)$$

式中：$f' = f - \bar{f}$。常数σ_t、C_g和C_d分别取0.85，2.86和2.0，S_{user}为用户定义源项。

混合分数均方值用在描述紊流－化学反应的封闭模型中（见下面）。

对于一个二混合分数问题，用 $\overline{f_{fuel}}$ 和 $\overline{f'^2_{fuel}}$ 分别代替方程14.1-4和14.1-5中的 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$，得到 $\overline{f_{fuel}}$ 和 $\overline{f'^2_{fuel}}$。在方程14.1-4中，用 $\overline{f_{\sec}}$ 代替 $\overline{f}$ 则得到 $\overline{f_{\sec}}$。因此用方程14.1-3可计算 $\overline{p_{\sec}}$，用 $\overline{p_{\sec}}$ 代替 $\overline{f}$，解方程14.1-5可得到 $\overline{p'^2_{\sec}}$。根据次流的总量与总质量流率相比相对要小这一事实，用 $\overline{p'^2_{\sec}}$ 而不是 $\overline{f'^2_{\sec}}$ 解方程证明是对的。对一个一阶近似值，在 $\overline{p_{\sec}}$ 和 $\overline{f_{\sec}}$ 间的差异对 $\overline{f_{fuel}}$ 相对敏感，因此，$\overline{p'^2_{\sec}}$ 基本上和 $\overline{f'^2_{\sec}}$ 相同。

大涡模拟（LES）非预混模型 （The Non-Premixed Model for LES）

对大涡模拟（LES），解一个关于平均混合分数的方程，该方程除了 μ_t 为次网格尺度粘度以外，形式上与方程14.1-4相同。

不解混合分数方差的输运方程。取而代之，混合分数均方值模拟如下：

$$\overline{f'^2} = C_{\text{var}} L_{sgs}^2 \left|\nabla \bar{f}\right|^2 \qquad (14.1\text{-}6)$$

式中：C_{var}＝用户可调节常数；L_{sgs}＝次网格尺度。

混合分数对等价比 （Mixture Fraction vs. Equivalence Ratio）

混合分数可理解为关于反应系统的公约数。考虑一个简单的燃烧系统，包括一种燃料流（F），一种氧化剂流（O）和一种产物流（P），在化学当量比条件下，用符号表示为：

$$F + rO \rightarrow (1+r)P \qquad (14.1\text{-}7)$$

式中r为质量基础上的空气燃料比。将平衡比表示为 ϕ，式中

$$\phi = \frac{(\text{空气} / \text{燃料})_{\text{实际}}}{(\text{空气} / \text{燃料})_{\text{化学当量}}} \qquad (14.1\text{-}8)$$

方程14.1-7中的反应，在多数普通混合条件下，可被写成：

$$\phi F + rO \rightarrow (\phi + r)P \qquad (14.1\text{-}9)$$

观察方程的左边，系统作为一个整体的混合分数可被推得为：

$$f = \frac{\phi}{\phi + r} \qquad (14.1\text{-}10)$$

方程14.1-10是一个非常重要的结果，允许在化学当量条件下（$\phi = 1$）或者在富燃料条件下（例如 $\phi > 2$）计算混合分数。

*f*与组分质量分数、密度及温度之间的关系 （Relationship of f to Species Mass Fraction, Density, and Temperature）：

混合分数模拟方法有利之处是将化学反应减少为一或二个守恒的混合分数。所有热化学标量（组分质量分率，密度和温度）均唯一与混合分数有关。给定反应系统化学性质与化学反应，系统其他的特定限制（见14.1.3），流场中任一点的瞬时守恒分数值可被用于计算每个组分摩尔分数、密度和温度值。

另外，如果反应系统是绝热的，对于一个单一的燃料－氧化剂系统，质量分数、密度和温度的瞬时值仅依赖于瞬时混合分数*f*：

$$\phi_i = \phi_i(f) \qquad (14.1\text{-}11)$$

如果包括一个次要流，瞬时值将依赖于瞬时燃料混合分数f_{fuel}和次要部分分数p_{sec}：

$$\phi_i = \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}) \qquad (14.1\text{-}12)$$

在方程14.1-11和14.1-12中，ϕ_i代表瞬时组分质量分数、密度或温度。在非绝热系统的情况下，对于单一混合分数系统，这种关系概括为：

$$\phi_i = \phi_i(f, H^*) \qquad (14.1\text{-}13)$$

式中H^*为瞬时焓（与方程11.2-7定义的*H*相一致）：

$$H^* = \sum_j m_j H_j = \sum_j m_j \left[\int_{T_{ref,j}}^{T} c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \right] \qquad (14.1\text{-}14)$$

如果包括次要流，

$$\phi_i = \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}, H^*) \qquad (14.1\text{-}15)$$

非绝热系统的例子包括有辐射、通过墙的传热、到或来自于分散相颗粒或小滴的传热以及不同温度下的多入口系统。14-18页提供这样非绝热系统的混合分数方法的其他细节。

ϕ_i（组分质量分数，密度和温度）与混合分数（方程14.1-11到14.1-15）的函数关系细节依赖于系统化学反应的描述。可以选择用火焰面（混和的即为燃烧的mixed－is－burned）、平衡化学反应或者非平衡化学反应（小火焰）模型来描述这种关系。

描述系统化学反应的模型 （Models Describing the System Chemistry）

当使用非预混模拟方法时，FLUENT提供三种用于描述系统化学反应的选项。三个选项为：

● 火焰面近似值the flame sheet approximation （混合的就是燃烧的，mixed－is－burned）：最简单的反应类型是火焰面近似值或mixed－is－burned近似值。这种方法假设化学反应无限快，不可逆，燃料和氧化剂组分在空间中永远不共存，并且一步完全转化为最终产物。这种描述允许组分质量分数用给定的反应化学当量直接确定，而不需要反应率或者化学平衡信息。这种简单的系统描述的组分质

量分数和混合分数之间服从直线关系，如图14.1.3所示。

由于不需要反应率或者平衡计算，火焰面近似值可以很容易地并且快速的计算出。然而，火焰面近似值模型受限于一步反应的预测，不能预测中间组分形成或离解效应。这经常会导致严重过高预测火焰峰值温度，特别是那些涉及高温的系统（例如，预热或者富氧）。

- 平衡假设Equilibrium Assumption：平衡模型假设对化学平衡来说，为使其总存在分子水平上，化学反应足够迅速。根据最小吉布斯自由能［120］法则，可用来由f计算组分摩尔分数。图14.1.4显示对在甲烷在空气中的燃烧中一个包括10种组分的反应系统的摩尔分数。

由于其能预测中间组份的生成以及不需要详细的化学动力学比率数据的知识，因此平衡模型很有效。取代定义一个专门多级反应机制（见13章），可以简单的定义系统中会出现的重要的化学组分。FLUENT会根据化学平衡预测每一种组分的摩尔分数。

FLUENT允许对那些瞬时混合分数低于指定富限f_{rich}以下的情况限制完全平衡计算。在富燃料区域（如，等价比大于1.5），当瞬时混合分数超过f_{rich}，FLUENT就假定燃烧反应熄灭，未燃燃料与已反应物质共存。在富燃料区域，根据已知化学当量，对混合分数给定值的混合物由限制混合（$f=f_{rich}$）和燃料入口流（f=1）组成计算。化学当量即可人为给出，也可由在富限（$f=f_{rich}$）处的化学平衡自动确定。本方法，如部分平衡法，允许在富火焰区域绕过复杂的平衡计算。后者计算耗时且可能不代表真正的燃烧过程。当需要完全平衡法时，可以简单定义富限为f_{rich}＝1.0。

14.3节为选择平衡计算中包括那些组分提供指导。包括的组分必须存在于prePDF访问的化学数据库中。注：化学平衡计算中包含的组分应该可能不含NO_x组分，因为NO_x反应率慢，不应用平衡假设对待。最为代替，应用并入了有限率化学动力学的FLUENT NO_x后处理器可以最精确地预测NO_x浓度。

- 非平衡化学反应Non-Equilibrium Chemistry (小火焰模型(Flamelet Model))：在非平衡效应的非常重要的燃烧模型中，假定局部化学平衡会导致不真实的结果。平衡假设被打破的典型例子是模拟碳氢化合物火焰的富边，预测控制NO_x生成的中间组分以及模拟射流火焰的lift-off和blow-off现象。

在一个接一个的例子基础上，有几种方法对克服这些模拟困难有用；在FLUENT中，部分平衡／富限近似值（上面讲的）能被用来模拟碳氢化合物火焰的富燃料边。小火焰模型已被提出作为一个对调整非平衡火焰化学反应问题的更为一般的解决方法。FLUENT中关于层流小火焰的详细资料见14.4节。

湍流－化学反应相互作用的PDF模拟(PDF Modeling of Turbulence-Chemistry Interaction)

方程14.1-11到14.1-15描述了通过平衡、小火焰或mixed is burned化学反应模型给出的混合分数与组分质量分数、密度和温度之间的瞬时关系。然而，FLUENT对预测紊态反应流动关心的是预测这些脉动量的时间平均值。这些时间平均值与依赖于湍流－化学反应相互作用模型的瞬时值是如何相关的呢？当应用非平衡模拟方法时，FLUENT应用假设分布几率密度函数法（PDF）作为封闭模型。本节将描述PDF封闭模型。

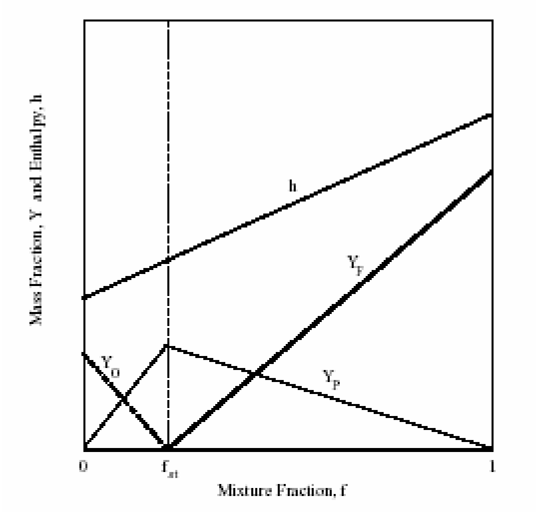


图14.1.3：应用火焰面近似值得到的组分质量分数和焓

Figure 14.1.3: Species Mass Fractions and Enthalpy Derived Using the Flame Sheet Approximation

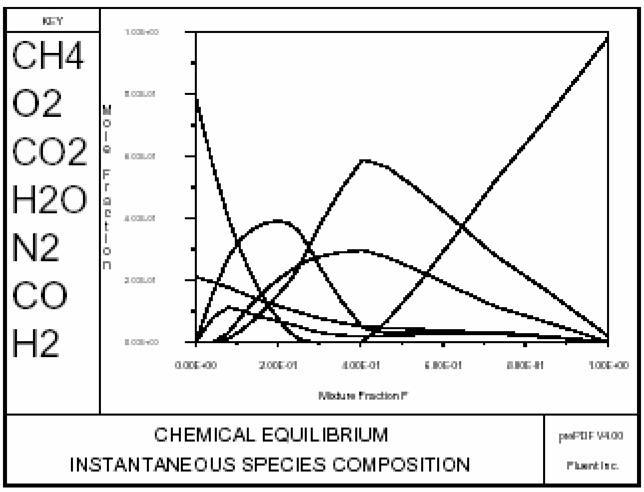


图14.1.4：根据化学平衡计算的组分摩尔分数

Figure 14.1.4: Species Mole Fractions Computed Based on Chemical Equilibrium

几率密度函数描述 （Description of the Probability Density Function）

几率密度函数，写作$p(f)$，可被考虑为流动花在状态f的时间分数。图14.1.5阐明了这一概念。f的脉动值绘在图的右边，依赖于一定范围Δf 的一些时间分数。

$p(f)$，绘在图左边，表现出在Δf 这段范围内曲线下面积值，与f在这段范围内的时间分数相等。写成数学型式，

$$p(f)\Delta f = \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_i \tau_i \qquad (14.1\text{-}16)$$

式中：T——时间尺度，τ_i——f花在Δf 段内的时间总量。函数$p(f)$的分布依赖于f中湍流脉动的本质。实际上，$p(f)$被表示为一个数学函数，近似为试验中观察到

的PDF形状。

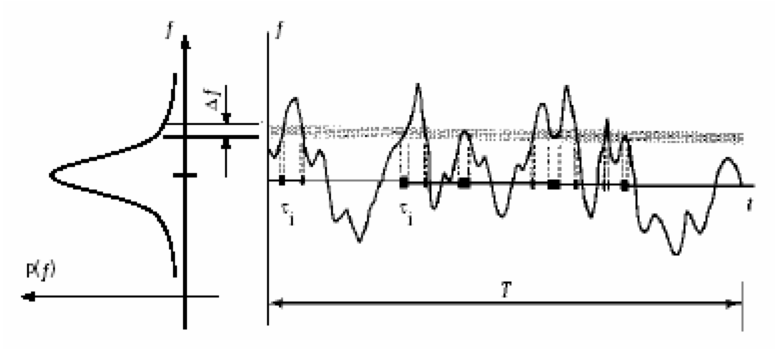


图14.1.5 几率密度函数$p(f)$的图形描述

Figure 14.1.5: Graphical Description of the Probability Density Function, $p(f)$

从瞬时混合分数推导平均标量值（Derivation of Mean Scalar Values from the Instantaneous Mixture Fraction）

几率密度函数$p(f)$，描述了湍流中f的瞬时脉动值，拥有非常有益的属性，即他可被用于计算依赖于f的变量的时间平均值。对一个单一混合分数系统，组分摩尔分数和温度的时间平均值可被计算为（在绝热系统中）

$$\overline{\phi}_i = \int_0^1 p(f)\phi_i(f)df \qquad (14.1\text{-}17)。$$

当存在次要流时，平均值计算为

$$\overline{\phi}_i = \int_0^1\int_0^1 p_1(f_{fuel})p_2(p_{\sec})\phi_i(f_{fuel}, p_{\sec})df_{fuel}dp_{\sec} \qquad (14.1\text{-}18)$$

式中：p_1为f_{fuel}的PDF，p_2为p_{sec}的PDF。这里，假定f_{fuel}和p_{sec}具有统计独立性，那么$p(f_{fuel},p_{sec})=p_1(f_{fuel})p_2(p_{sec})$。

类似地，对单一混合分数系统，真时间平均密度，$\overline{\rho}$，可被计算为

$$\frac{1}{\overline{\rho}} = \int_0^1 \frac{p(f)}{\rho(f)}df \qquad (14.1\text{-}19)。$$

当存在次要流时，为

$$\frac{1}{\overline{\rho}} = \int_0^1\int_0^1 \frac{p_1(f_{fuel})p_2(p_{\sec})}{\rho(f_{fuel}, p_{\sec})}df_{fuel}p_{\sec} \qquad (14.1\text{-}20)。$$

$\rho(f)$或$\rho(f_{fuel}, p_{\sec})$为用气体定律方程中瞬时组分摩尔分数和温度得到的瞬时密度。方程14.1-19和14.1-20提供了比应用用时间平均组分和温度的气体定律替代方法对时间平均密度更为精确的描述。

应用方程14.1-17和14.7-19（或方程14.1-18和14.1-20），其仅保留指定函数$p(f)$（或者$p_1(f_{fuel})$和$p_2(p_{sec})$）的分布以便确定流场中所有点上的流体局部时间平均状态。

PDF形状（The PDF Shape）

FLUENT中假定PDF的形状，$p(f)$，由两个数学函数中的一个来描述：

- 双δ函数
- β函数

双δ函数是最容易计算的，而β函数最接近实验观察到的PDF。这些函数产生的分布仅依赖于平均混合分数$\overline{f}$及其变化量$\overline{f'^2}$。选择这些函数（包括其他，如截尾正态分布）拥有其在浓度脉动实验测量方面的基础［17，105］。下面详细介绍每一个函数。

双δ函数PDF（The Double Delta Function PDF）

双δ函数用接近f=1和f=0的适合的边界给定

$$p(f)=\begin{cases}0.5, & f=\overline{f}-\sqrt{\overline{f'^2}}\\ 0.5, & f=\overline{f}+\sqrt{\overline{f'^2}}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \quad (14.1\text{-}21)$$。

14.1.6介绍了一个双δ函数的例子。如上提到，双δ函数PDF非常容易计算，但是精度总是比β函数PDF低。据此，双δ函数PDF仅能用在特殊环境中。

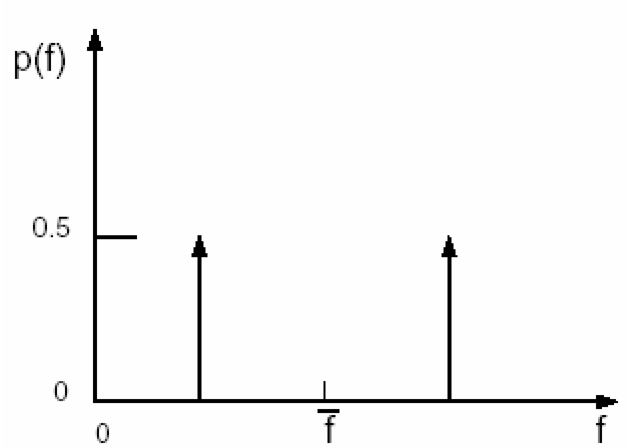


图14.1.6：双δ函数PDF形状例子

Figure 14.1.6: Example of the Double Delta Function PDF Shape

β函数PDF （The β-Function PDF）

β函数PDF形状通过关于$\overline{f}$和$\overline{f'^2}$的下述函数给定：

$$p(f)=\frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}df} \quad (14.1\text{-}22)$$

式中：

$$\alpha = \overline{f}\left[\frac{\overline{f}(1-\overline{f})}{\overline{f'^2}} - 1\right] \qquad (14.1\text{-}23)$$

$$\beta = (1-\overline{f})\left[\frac{\overline{f}(1-\overline{f})}{\overline{f'^2}} - 1\right] \qquad (14.1\text{-}24)$$

图14.1.7和图14.1.8显示由 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$ 两个条件形成的 β 函数。

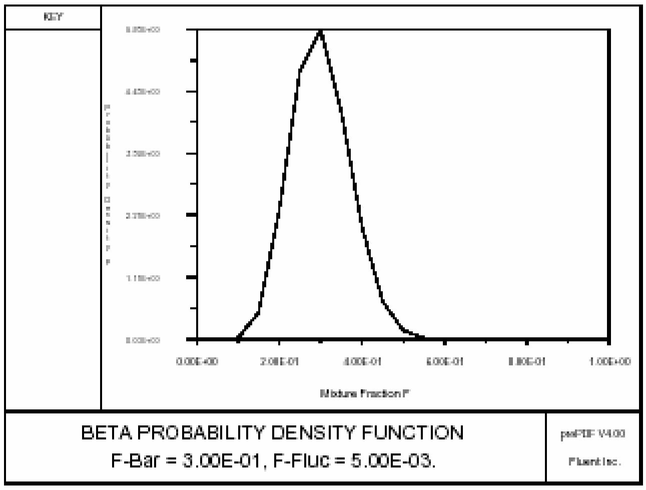


图14.1.7： $\overline{f} = 0.3$ 和 $\overline{f'^2} = 0.005$ 时， β 函数PDF形状

Figure 14.1.7: β -Function PDF Shapes for $\overline{f} = 0.3$ and $\overline{f'^2} = 0.005$

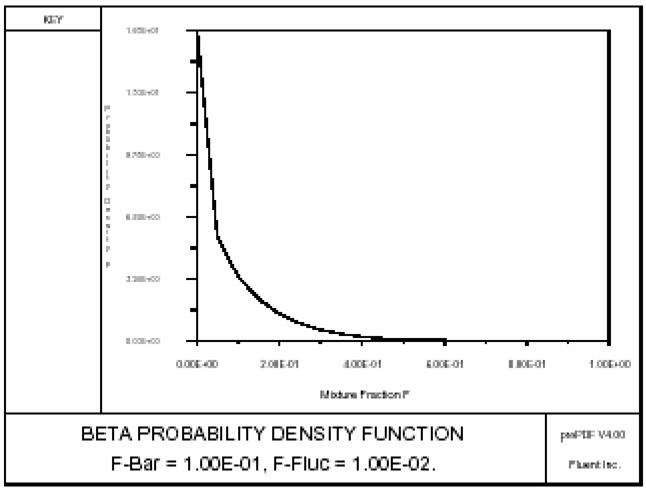
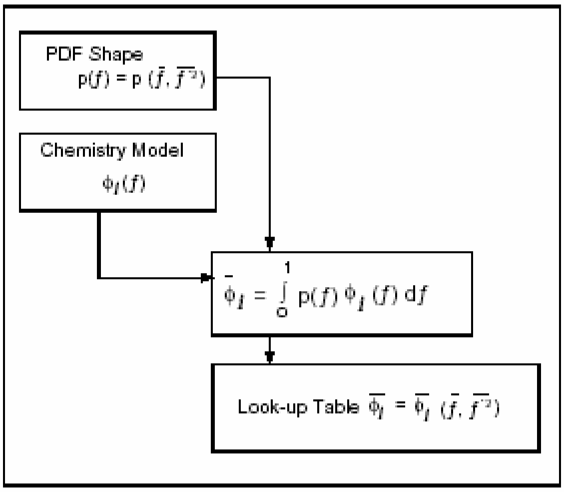


图14.1.8： $\overline{f} = 0.1$ 和 $\overline{f'^2} = 0.01$ 时， β 函数PDF形状

Figure 14.1.8: β -Function PDF Shapes for $\overline{f} = 0.3$ and $\overline{f'^2} = 0.005$

重要的是，可根据其最初两个因素，即 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$ ，计算出流动中在所有点上

的PDF形状$p(f)$。因此，给定流场中每一点上的 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$ 的FLUENT预测值（方程14.1-4和14.1-5），可以计算出已知的PDF形状并作为额外的方程结合用方程14.1-17和14.1-19（或者对包括次要流的系统，为方程14.1-18和14.1-20）来确定组分质量分数、密度和温度的时间平均值。图14.1.9描述了单一混合分数的逻辑依赖关系。(包括次要流时，PDF形状将为燃料混合分数f_{fuel}和次要部分分数p_{sec}进行计算，计算不同也顺序，见图14.2.2)。



14.1.9：关于 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$ 的平均标量 $\overline{\phi_i}$ 以及化学反应模型

的逻辑依赖关系（绝热，单一混合分数系统）

Figure 14.1.9: Logical Dependence of Averaged Scalars $\overline{\phi_i}$ on $\overline{f}$，$\overline{f'^2}$ and

the Chemistry Model (Adiabatic, Single-Mixture-Fraction Systems)

非预混模型的非绝热拓展 （Non-Adiabatic Extensions of the Non-Premixed Model）

许多反应系统包括通过对流和辐射换热对墙壁、小滴或者颗粒的传热。在这样的流动中，局部热化学状态不再仅与f有关，还与焓H^*有关。系统焓影响着化学平衡计算和反应后流动的温度。因此，当由混合分数计算标量时，必须考虑由于热损失引起的焓的变化。因而，标量依赖关系变为

$$\phi_i = \phi_i(f, H^*) \qquad (14.1\text{-}25)$$

式中：H^*由方程14.1-14给定。在这样的非绝热系统中，应当利用一个联合几率密度函数 $p(f,H^*)$来考虑紊动脉动。然而，对多数工程应用来说，$p(f,H^*)$的计算不可行。通过假定焓的脉动独立于焓的水平（例如，热损失不会严重地影响紊动焓脉动）可对问题可进行重要的简化。在这样的假设条件下，可再次得到$p=p(f)$及

$$\overline{\phi_i} = \int_0^1 \phi_i(f, \overline{H^*})p(f)df \qquad (14.1\text{-}26)$$

因此在非绝热系统中 $\overline{\phi_i}$ 的确定需要解时间平均焓的模拟输运方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{H^*})+\nabla\cdot(\upsilon\bar{v}\overline{H^*})=\nabla\cdot\left(\frac{k_i}{c_p}\nabla\overline{H^*}\right)+S_h \qquad (14.1\text{-}27)$$

式中源项S_h考虑了对墙边界的辐射、传热以及与第二相之间的热交换。图14.1.10描述了关于FLUENT中对非绝热单一混合分数系统里的$\overline{f}$，$\overline{f'^2}$以及$\overline{H^*}$预测的平均标量值（组分质量分数，密度和温度）的逻辑依赖关系。

当系统包括次要流时，标量依赖关系变为

$$\phi_i=\phi_i(f_{fuel},p_{\sec},H^*) \qquad (14.1\text{-}28)$$

平均值由下面式计算：

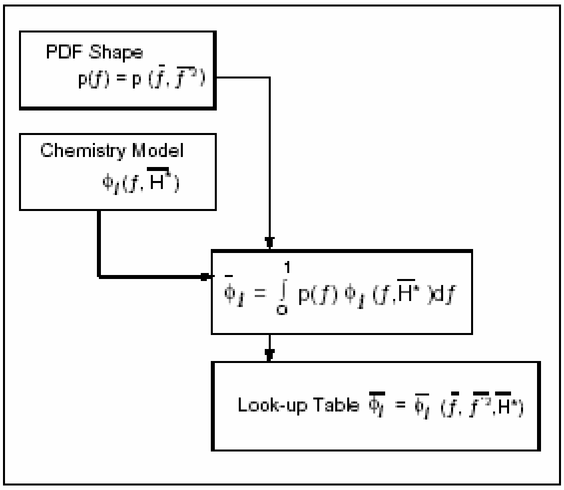


图14.1.10：关于$\overline{f}$，$\overline{f'^2}$和$\overline{H^*}$的平均标量$\overline{\phi_i}$与化学反应模型

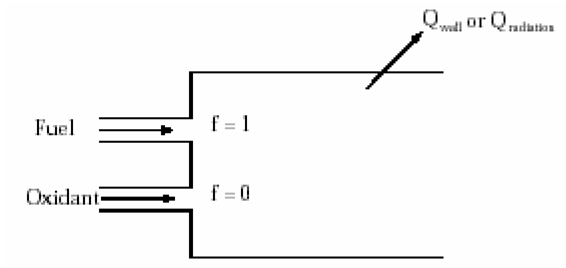
的逻辑依赖关系（非绝热，单一混合分数系统）

Figure 14.1.10: Logical Dependence of Averaged Scalars $\overline{\phi_i}$ on and $\overline{f}$, $\overline{f'^2}$, $\overline{H^*}$

and the Chemistry Model (Non-Adiabatic, Single-Mixture-Fraction Systems)

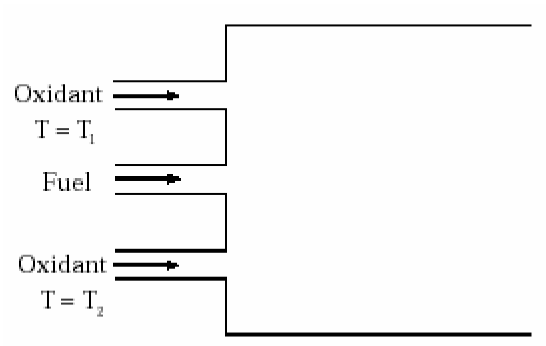
$$\overline{\phi_i}=\int_0^1\int_0^1\phi_i(f_{fuel},p_{\sec},\overline{H^*})p_1(f_{fuel})p_2(p_{\sec})df_{fuel}dp_{\sec} \qquad (14.1\text{-}29)$$

如上所述，包括对墙的传热以及辐射的系统需用PDF模型的非绝热扩展部分。另外，拥有不同入口温度的多燃料和氧化剂入口或者包括废气循环的系统需用非绝热模型。最后，在载有粒子的流动中（例如，液体燃料系统或煤燃烧系统）需用非绝热模型，因为载有粒子的流动含有对分散相的传热。图14.1.11阐明了几种必须包括PDF模型的非绝热形式的系统。注：即使系统是非绝热的，也可以进行更简单一点的绝热计算作为初始练习。这将允许你应用一种有效的方式来限制非绝热分析，如14.3节所述。



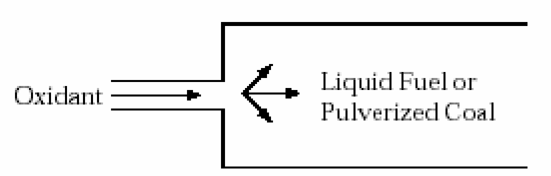
(a)　到主边界的传热和 / 或辐射传热

(a) Heat Transfer to Domain Boundaries and/or Radiation Heat Transfer



（b）不同温度的多燃料和氧化剂入口

(b) Multiple Fuel or Oxidant Inlets at Different Temperatures



（c）分散相传热传质（如，液体燃料或煤燃烧）

(c) Dispersed Phase Heat or Mass Transfer (e.g., Liquid Fuel or Coal Combustion)

图14.1.11：需要非绝热非预混模型方法的反应系统

Figure 14.1.11: Reacting Systems Requiring Non-Adiabatic Non-Premixed Model Approach

14.1.3非预混模拟的限制和特有案例（Restrictions and Special Cases for Non-Premixed Modeling）

混合分数法的限制　（Restrictions on the Mixture Fraction Approach）

ϕ_i（组分质量分数、密度或温度）对f的唯一依赖关系（方程14.1-11或14.1-13）

需要反应系统满足下列条件：

- 化学反应系统必须是有分离的燃料和氧化剂入口的扩散类型（喷雾（喷射）燃烧和粉碎燃料火焰也可属此类）。
- 刘易斯（Lewis）数需统一。（这表示所有组分和焓的扩散系数相等，是对湍流的良好的近似）。
- 当使用单一混合分数时，必须满足下列条件：
  - 仅含一种类型的燃料。燃料可由反应组分（例如，90％的CH_4和10％的CO）的一种燃烧混合物组成，可包括多燃料入口。然而，多燃料

入口必须有同样的成分。不允许有两个以上的有不同燃料成分的燃料入口（如，一个入口为CH_4，一个入口为CO）。类似的，在喷雾燃烧系统或包含反应粒子的系统中，仅允许有一种废气。

－仅含一种氧化剂。氧化剂可包括一种组分混合物（如，21％O_2，79％N_2），可以有多个氧化剂入口。然而，多氧化剂入口必须包含相同的成分。不允许有两个及以上有不同成分的氧化剂入口（如，一个入口为空气，第二而入口为纯氧气入口）。

- 当使用两个混合分数时，系统中可包含三个流。下面是有效的系统：

－有两个不同组成的燃料流和一个氧化剂流。每一个燃料流可由一种反应组分混合物组成（例如，90％的CH_4和10％的CO）。可包括每一种燃料流的多入口，但是每一个燃料流入口必须有两种定义的成分中的一种（如，一个入口为CH_4，一个入口为CO）。

－包括气－液，气－煤，或者液－煤燃料混合物和一种氧化剂的混合燃料系统。在拥有气－煤或液－煤燃料混合物的系统中，煤挥发分和焦炭作为一种单一成分燃料流来对待。

－分别跟踪含有挥发分和焦炭的煤燃烧。

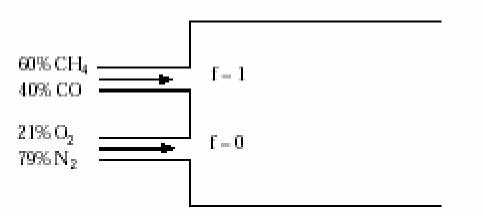
－含有不同成分的两种氧化剂流和一种燃料流。每一氧化剂流可由一种多组份的混合物组成（例如，21％O_2，79％N_2）。每一种氧化剂可以有多入口，但是，每一个氧化剂入口必须含有两种定义成分中的一种（例如，一个入口为空气，第二个入口为纯氧气）。

－一个燃料流，一个氧化剂流和一种非反应次要流。

- 必须为湍流。

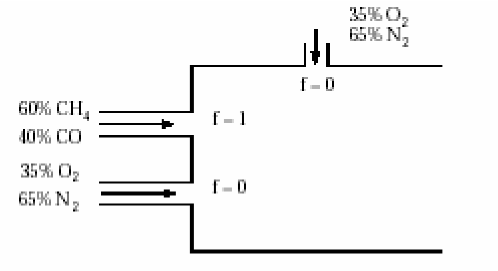
强调对直接模拟预混燃烧来说这些限制消除了使用非预混的方法非常重要。这是因为未燃预混流远离化学平衡。注：然而，16章中描述了一种扩展的混合分数公式，其可被用在预混和部分预混火焰中。

图14.1.12和14.1.13为FLUENT中能用非预混模型处理的典型反应系统结构。图14.1.14为不能用非预混模型模拟的预混结构。



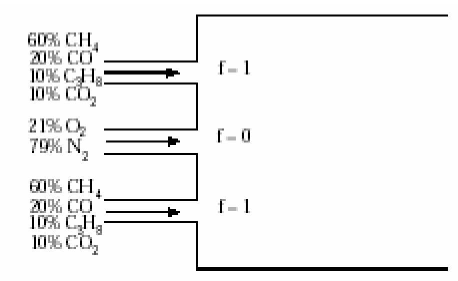
（a）　简单燃料 / 氧化剂扩散火焰

(a) Simple Fuel/Oxidant Diffusion Flame



（b）　用多氧化剂入口的扩散系统

(b) Diffusion System Using Multiple Oxidant Inlets

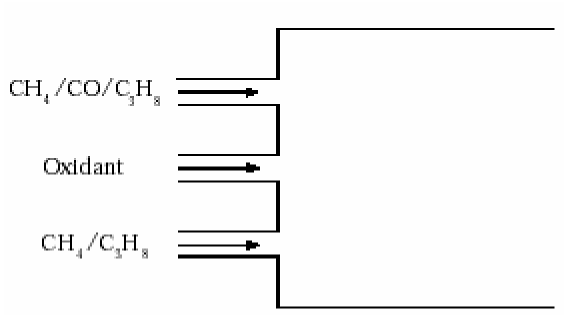


（c）　用多燃料入口的系统

(c) System Using Multiple Fuel Inlets

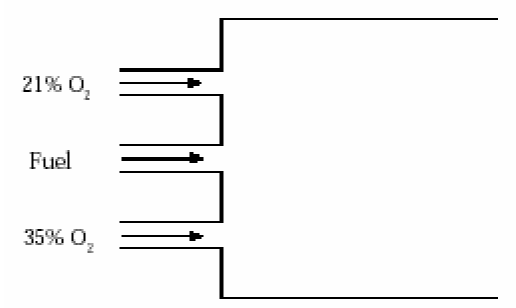
14.1.12：能用单一混合分数模拟的化学反应系统

Figure 14.1.12: Chemical Systems That Can Be Modeled Using a Single Mixture Fraction



（a）　包含两个不同燃料入口系统

(a) System Containing Two Dissimilar Fuel Inlets



（b）包含两种不同氧化剂入口的系统

(b) System Containing Two Dissimilar Oxidant Inlets

图14.1.13：能用两个混合分数模拟的化学反应系统结构

Figure 14.1.13: Chemical System Con_gurations That Can Be Modeled Using Two Mixture Fractions

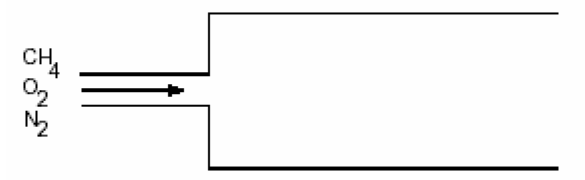


图14.1.14：不能用非预混模型模拟的预混系统

Figure 14.1.14: Premixed Systems CANNOT Be Modeled Using the Non-Premixed Model

液体燃料或煤燃烧非预混模型　（Using the Non-Premixed Model for Liquid Fuel or Coal

combustion）

如果在模拟中包括小液滴和／或煤颗粒，可以应用非预混模型。在这种情况下，燃料以通过蒸发、液化作用和焦炭燃烧定律控制的分散相确定的比率进入计算域中的气相中。在为煤的情况下，挥发分和焦炭产物可被定义为两种不同的燃料类型（用两个混合分数）或这定义为单一废气成分（用一个混合分数），14.3.5节有所描述。

带有废气循环的非预混模型 （Using the Non-Premixed Model with Flue Gas Recycle）

由于用非预混模型解决的多数问题将包含既含有纯氧化剂有含有纯燃料（f=0或f=1）的入口，因此可包括有一个混合分数中间值（0<f<1）入口，这个入口代表一个完全的反应的混合物，并提供混合分数中间值。当有废气循环时，这样的情况就会出现，如图14.1.15简述。由于f为一个守恒量，废气循环入口处的混合分数可计算作

$$\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{recyc} f_{exit} = (\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{ox} + \dot{m}_{recyc}) f_{exit} \qquad (14.1\text{-}30)$$

或

$$f_{exit} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{ox}} \qquad (14.1\text{-}31)$$

式中：f_{exit}为出口混合分数（和废气循环入口处的混合分数），$\dot{m}_{ox}$为氧化剂入口的质量流量速率，$\dot{m}_{fuel}$为燃料入口的质量流量速率，$\dot{m}_{recyc}$为循环入口的质量流量速率。

如果包括次要流，则为

$$f_{fuel,exit} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{sec} + \dot{m}_{ox}} \qquad (14.1\text{-}32)$$

$$p_{sec} = \frac{\dot{m}_{sec}}{\dot{m}_{sec} + \dot{m}_{ox}} \qquad (14.1\text{-}33)$$

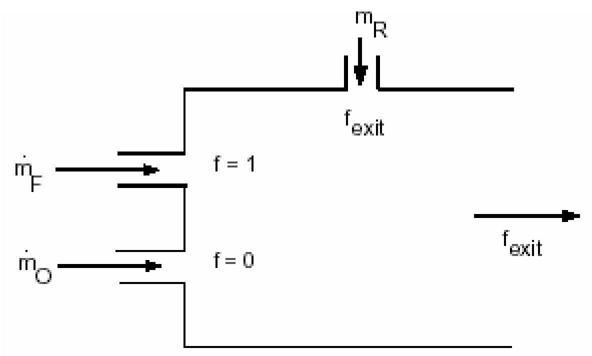


图14.1.15：带有废气循环的非预混模拟

Figure 14.1.15: Using the Non-Premixed Model with Flue Gas Recycle

14.2 非预混平衡化学反应的模拟方法 Modeling Approaches for

Non-Premixed Equilibrium Chemistry

FLUENT 软件包为模拟非预混平衡化学反应提供了两种不同方法。既可以选择单一混合分数法，也可以选择二混合分数法，这依赖于有多少个流（stream）。PrePDF 储存“look-up tables”中关于流的信息，这些信息随后被 FLUENT 用来解混合分数、焓以及各种标量。更多关于 prePDF 的信息，见 14.3 节。

14.2.1单一混合分数法 （Single-Mixture-Fraction Approach）

为保持计算时间最小，非预混模型中多数的计算通过在 FLUENT 模拟以外用单独代码预处理化学计算并进行 PDF 积分，这称为 prePDF。图 14.2.1 解释了计算是如何在预处理器（prePDF）和求解器（FLUENT）间分开的。在 prePDF 中，化学模型（mixed-is-burned，平衡化学，层流小火焰）用来连接假设的 PDF 分布以执行方程 14.1-17，14.1-19 和 / 或 14.1-26 中给定的积分。这些积分在 prePDF 中执行并储存在把平均热化学变量$\overline{\phi_i}$（温度，密度和组分质量分数）与$\overline{f}$，$\overline{f_s'^2}$和H^*关联起来的查询表中。注：表格中用比例化的混合分数（scaled mixture fraction）变量，式中$\overline{f_s'^2}$定义为

$$\overline{f_s'^2} = \frac{\overline{f'^2}}{0.25\overline{f}(1-\overline{f})} \qquad (14.2\text{-}1)$$

FLUENT 中解方程 14.1-4，14.1-5 和 14.1-27（非绝热系统）得到$\overline{f}$，$\overline{f_s'^2}$和H^*的局部值。

14.2.2二混合分数法（Two-Mixture-Fraction Approach）

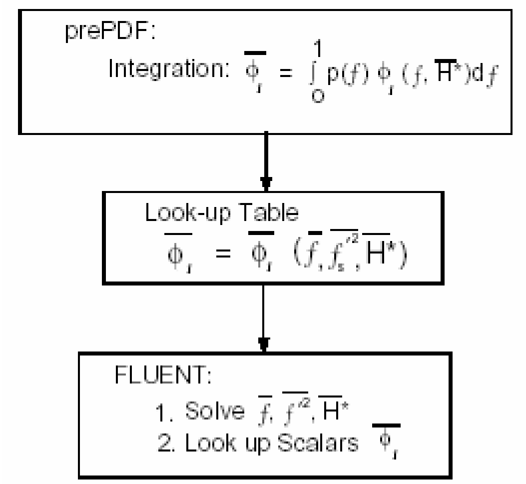


图 14.2.1 对单一混合分数情况下 FLUENT 和 prePDF 之间计算任务的分配

Figure 14.2.1: Separation of Computational Tasks Between FLUENT and prePDF for a Single-Mixture-Fraction Case

对二混合分数（次要流）的情况，prePDF 预处理器计算温度、密度和组分

质量分数（方程 14.1-12 或 14.1-15）的瞬时值，并将他们储存在查询表中。对用二混合分数的绝热情况，查询表包含作为燃料混合分数和次要流部分分数函数的 $\overline{\rho}$，$\overline{T}$ 以及 $\overline{Y_i}$ 。对二混合分数的非绝热情况，三维查询表中包含作为燃料混合分数，次要流部分分数和瞬时焓函数的物理属性。

燃料混合分数和次要流部分分数的几率密度函数 p_1 和 p_2 分别由解出的混合分数及它们的变化量来在 FLUENT 中进行计算。计算属性平均值的 PDF 积分也在 FLUENT 完成(用方程 14.1-18 或 14.1-29，与 14.1-20 或它的非绝热等价方程)。积分中需要的瞬时值从查询表中获得。

！注：对二混合分数情况，其在 FLUENT 中的计算时间要比单一混合分数问题长很多，因为 PDF 积分在 FLUENT 进行，而不是在 prePDF 中。选择二混合分数模型前应当仔细考虑这种代价。作为权宜之计，通常从收敛的单一混合分数解开始二混合分数模拟。

图 14.2.2 解释了对二混合分数情况 prePDF 和 FLUENT 之间的分工。

14.2.3 查询表概念 （The Look-Up Table Concept）

绝热系统查询表 （Look-Up Tables for Adiabatic Systems）

图 14.2.3 解释了对单一混合分数系统 prePDF 产生的查询表概念。给定在流域中一点上 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$ 的 FLUENT 预测值，由表中可获得该点处的时间平均质量分数，时间平均密度和时间平均温度（$\overline{\phi_i}$）。FLUENT 首先用方程 14.2-1 计算比例化的混合分数变化量 $\overline{f_s'^2}$，因为单一混合分数查询表中包括作为 $\overline{f}$ 和 $\overline{f_s'^2}$ 函数的属性数据，而不是作为 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$ 函数的属性数据。

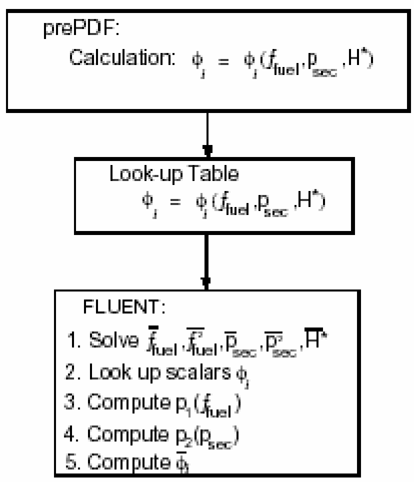


图 14.2.2：对二混合分数情况 FLUENT 和 prePDF 间的计算任务分割

Figure 14.2.2: Separation of Computational Tasks Between FLUENT and prePDF for a Two-Mixture-Fraction Case

图 14.2.3 中的表是方程 14.1-17 积分的数学结果。对关心的每一个标量（组分质量分数，密度，温度），只有一个这种类型的查询表。在瞬时焓只是瞬时混合分数的函数的绝热系统中，像图 14.2.3 那样，需要一个二维查询表。

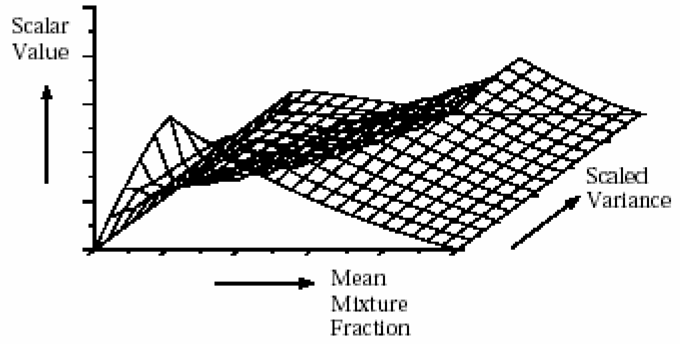


图 14.2.3：绝热单一混合分数系统中作为 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$ 函数的标量 $\overline{\phi_i}$ 的查询表的可视化表示

Figure 14.2.3: Visual Representation of a Look-Up Table for the Scalar $\overline{\phi_i}$

as a Function of $\overline{f}$ and $\overline{f'^2}$ in Adiabatic Single-Mixture-Fraction Systems

对于一个二混合分数系统，将为作为燃料混合分数 f_{fuel} 和次要流部分分数 p_{sec}（方程 14.1-12）函数的标量属性 $\overline{\phi_i}$ 建立一个查询表，见图 14.2.4。

表 14.2.1 总结了查询表结构。

非绝热系统三维查询表 （3D Look-Up Tables for Non-Adiabatic Systems）

在非绝热系统中，焓与混合分数不成线性关系，但是也依赖于墙的传热和／或辐射，需要为每一个系统中可能的焓值建立查询表。结果是建成三维的查询表，如图 14.2.5 所示，图由二维表层组成，每一层都相应正常的热损或增热。第一层或片相应于系统的最大热损失，在那里查询表中所有的点为问题建立中定义的最低温度。最大片相应于当所有点已经达到定义的最高温度发生时的增热。零热损／增热片相应于绝热运算。插入绝热和最高片之间的片相应于增热，插入绝热和最低片之间的片相应于热损。

三维查询表允许 FLUENT 从 $\overline{f}$，$\overline{f'^2}$ 和 $\overline{H^*}$ 的计算值中确定每一个质量分数，密度和温度的值。三维表是方程 14.1-26 积分的可视化表现。

对二混合分数问题，三维查询表允许 FLUENT 为对来源于 f_{fuel}，p_{sec} 和 H^* 瞬时值的标量属性确定瞬时值。三位表是方程 14.1-28 的可视化表现。这些瞬时值用来完成方程 14.1-29 的积分。

表 14.2.1 为查询表结构总结。

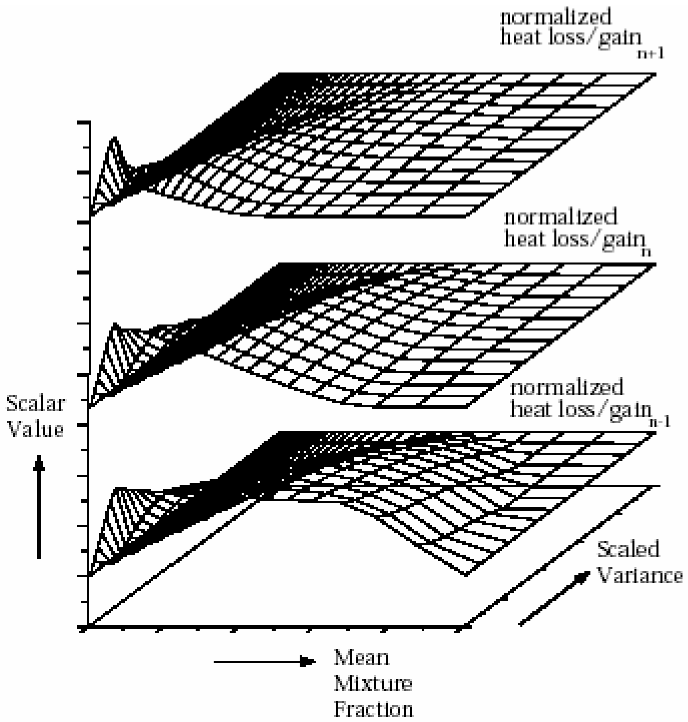


图 14.2.5：在非绝热单一混合分数系统中，作为 $\overline{f}$ and $\overline{f'^2}$ 函数

的标量 $\overline{\phi_i}$ 的查询表的可视化表现

Figure 14.2.5: Visual Representation of a Look-Up Table for the Scalar $\overline{\phi_i}$ as a Function of

$\overline{f}$ and $\overline{f'^2}$ and Normalized Heat Loss/Gain in Non-Adiabatic Single-Mixture-Fraction Systems

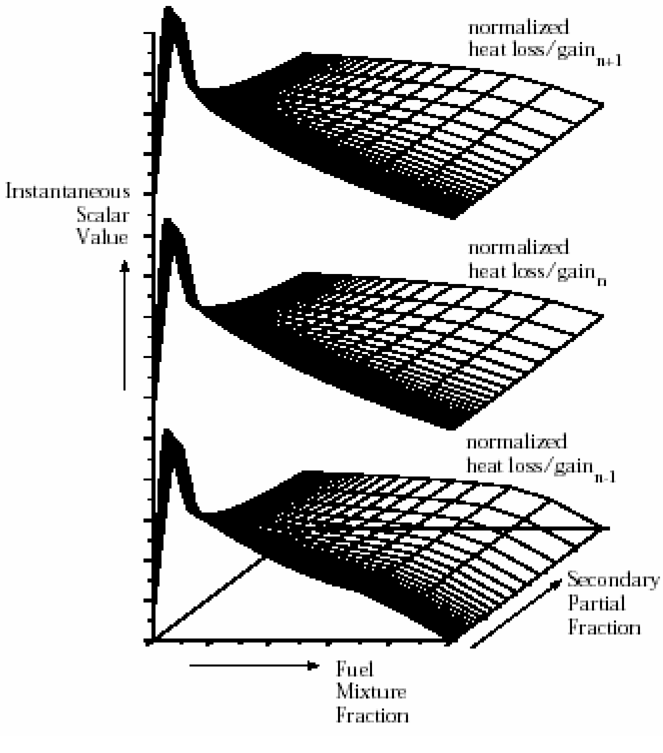


图 14.2.6：在非绝热二混合分数系统中，作为 f_{fuel}, p_{sec} 函数的

标量 $\overline{\phi_i}$ 的查询表和正常热损 / 增热的可视化表现

Figure 14.2.6: Visual Representation of a Look-Up Table for the Scalar $\overline{\phi_i}$ as a Function of f_{fuel}, p_{sec}, and

Normalized Heat Loss/Gain in Non-Adiabatic Two-Mixture-Fraction Systems

查询表格式总结 （Summary of Look-Up Table Formats）

表 14.2.1 为不同类型非预混模型的查询表格式总结

表14.2.1：查询表格式

Table 14.2.1: Look-Up Table Formats

模型类型	绝热	非绝热
单一混合分数	$\overline{f}, \overline{f_s'^2}$	$\overline{f}, \overline{f_s'^2}, H^*$
二混合分数	$f_{fuel}, p_{\sec}$	$f_{fuel}, p_{\sec}, H^*$

14.3 非预混平衡模型的用户输入 （User Inputs for the Non-Premixed Equilibrium Model ）

非预混平衡模型的用户输入（prePDF和FLUENT中）包括下列几节：

- 14.3.1：prePDF中问题的定义顺序 Problem Definition Procedure in prePDF
- 14.3.2：prePDF报告的情报信息和错误 Informational Messages and Errors Reported by prePDF
- 14.3.3：FLUENT中非预混模型输入和解决顺序 Non-Premixed Model Input and Solution Procedures in FLUENT
- 14.3.4：模拟液体燃料燃烧 Modeling Liquid Fuel Combustion
- 14.3.5：模拟煤燃烧 Modeling Coal Combustion

14.3.1 prePDF中问题的定义顺序 （Problem Definition Procedure in prePDF）

如图14.2.1和图14.2.2所示，用非预混平衡法解化学反应流动从prePDF中问题定义开始。

对单一混合分数问题，将在prePDf中执行下列步骤：

1、定义反应系统模型中考虑的化学组分并选择系统的化学描述。应该总是用默认的平衡化学选项。如果模拟一个没有反应的混合问题，或者用平衡选项没有得到解并且替换组分成分不可接受时，可以用无限快化学反应选项。

2、指明问题是否是绝热的。

3、选择用来描述混合分数中紊动脉动的PDF（几率密度函数）分布。默认为 β －PDF，除非有特殊原因时才可选双 δ －PDF。

4、计算查询表，包括作为平均混合分数、混合分数变化量和焓的函数的组分质量分数、密度和温度的平均（时间平均）值。这个查询表的内容将反映描述

紊流反应系统的上述输入。

查询表为prePDF的计算结果。它储存这方程14.1-14（或14.1-26）和14.1-19积分的结果。查询表将被FLUENT用来根据混合分数值（ $\overline{f}$ ）、混合分数变化量值（ $\overline{f'^2}$ ）和焓值（ H^* ）来确定在FLUENT计算反应流动过程中被计算的平均组分质量分数，密度和温度。见14.2节和图14.2.3和14.2.5。

对一个包括次要流的问题（而且因此包括一个次要混合分数），将先执行上面为 混合分数法的前三步，接着应用方程14.1-12或14.1-15准备一个瞬时属性的查询表。

下面一步步的顺序将通过问题定义顺序解释如和使用prePDF以及解释如何使用输入。

第一步：启动prePDF （Start prePDF）

在UNIX系统和Windows系统下，启动prePDF的方式不同。安装过程（计算机类型单独安装指导书中描述的）设计为当你遵循适当的指导时确保prePDF程序启动。如果不行，咨询计算机系统经理或FLUENT支持工程师。

在UNIX系统上启动prePDF

在UNIX机器上，在命令提示符下键入

prepdf

在Windows系统上启动prePDF

对一个Windows系统，启动prePDF有两种方式：

- 点击"开始"按钮，选择"程序"菜单，选择Fluent.Inc菜单，紧接着选prePDF程序项。(注：如果当安装prePDF时默认的Fluent.Inc程序组名改了，会发现prePDF菜单项用新名被安排在程序组中， 而不是在Fluent.Inc程序组中。)
- 在MS-DOS命令提示符窗口中提示符后键入"prepdf"启动。然而，作这些工作前，必须首先调整用户环境以便MS-DOS命令应用程序发现prepdf。可以通过选择程序项中的"Set Environment"作这些工作。"Set Environment"也可在Fluent.Inc程序组中找到。这个程序将添加Fluent.Inc目录到命令提示路径。

热动力学数据库 （The Thermodynamic Database）

prePDF使用热动力学数据库［112］而且必须能访问数据库文件，THERMO.DB。这个文件必须放在运行prePDF的目录上，或者必须通过环境变量THERMODB访问它。THERMODB指定文件的位置。在多数的安装中，将应用Fluent.Inc提供的使用顺序运行prePDF，并且这些顺序会为你设置环境变量。

第二步：分配内存 （Allocate Memory）

prePDF使用的内存总量一旦被分配后，不重新启动应用程序，是不能改变的。因此，必须分配足够的内存给PDF表中的点数最大值，组分最大值以及计划使用的小火焰最大值。

调整内存分配的参数如下：

"Maximum Number of Species"为PDF表中组分的最大值。默认值为20，这个参数可最大升至65。

"Maximum Number of f-mean Points"为PDF表中混合分数点数的最大值。默认值为45，

参数最大可升至100。

“Maximum Number of f-var Points”为PDF表中混合分数变化量点数的最大值。默认值为22，最大可升至30。

“Maximum Number of Enthalpy Points”为PDF表中焓的点数的最大值。默认值为45，最大可升至100。

“Maximum Number of Scalar Dissipation Points in Adiabatic Flamelet PDF Table ”绝热小火焰PDF表中最大标量扩散点数默认值为45，最大可升至100。

“Maximum Number of Flamelets”为小火焰模型中小火焰数的最大值。默认值为20，最大可升至30。

可以在内存分配面板（Memory Allocation panel）中设置这些参数（图14.3.1）。

Setup→Memory Allocation…

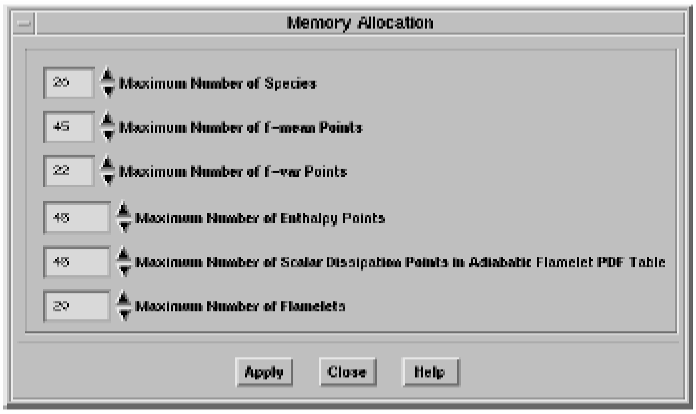


图14.3.1：prePDF中内存分配面板

Figure 14.3.1: The Memory Allocation Panel in prePDF

单击“Apply”，将为这些参数分配内存。如果需要在安装过程中晚些分配内存，则需要保存一个输入文件，退出prePDF并重起。然后，分配合适的内存数量，将输入文件读入prePDF，继续问题的建立。

注：如果读一个输入文件或PDF文件而没有首先分配内存，prePDF将根据文件中指定的组分数和点数分配内存。如果这个数比默认分配小，将会分配默认内存。如果大于，将会为文件中的组分和点的数分配适当的内存。

第三步：初始化问题定义 （Initialize the Problem Definition）

一旦分配好内存，在prePDF中的第一个任务是定义想要使用的反应系统和反应模型的类型。这一任务包括下面几个选项：

- 添加次要流 （Addition of a secondary stream）。
- 部分预混模型选项（见16章）（Partially premixed model option）
- 绝热或非绝热模拟选项（见14.1.2节）（Adiabatic or non-adiabatic modeling options）。
- 平衡化学模型或化学当量反应（mixed-is-burned）模型（见14.1.2节）（Equilibrium chemistry model or stoichiometric reaction (mixed-is-burned) model ）。

! 设置小火焰PDF模型的顺序在14.1.6节描述。

- β －PDF或双δ －PDF（见14.1.2节）（Beta PDF or Double-Delta PDF）。
- 经验定义燃料和／或次要流组成（Empirically de_ned fuel and/or secondary stream composition）。

你后来的输入及prePDF希望来自你的输入依赖于这些选择。

可以用“Define Case”面板对这些模型进行选择（图14.3.2）。

Setup→Case…

下面详细介绍每一个模拟选择。完成输入后确定单击“Apply”。

如果模拟一个有单一燃料和单一氧化剂流组成的系统，则不需要在PDF计算中启动次要流。如14.1.2节所讨论，如果PDF反应模型中将包括下列情形之一，则要启动次要流：

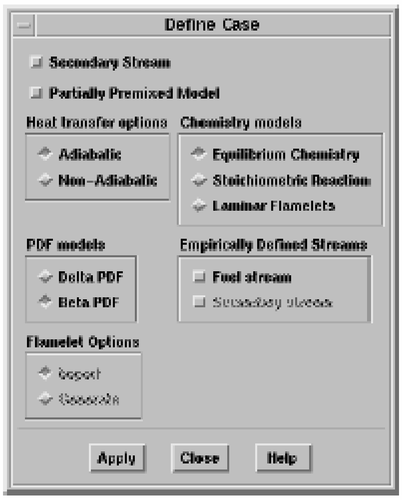


图14.3.2：prePDF中Define Case面板

Figure 14.3.2: The Define Case Panel in prePDF

- 两种不相似的气体燃料流：在这些模拟中，燃料流定义为燃料中的一种，次要流定义为第二种燃料。
- 不相似气体和液体燃料的混合燃料系统：在这些模拟中，燃料流定义为气体燃料，次要流定义为液体燃料（或者，反之亦然）。
- 不相似气体燃料和煤燃料的混合燃料系统：在这些模拟中，燃料流必须定义为煤，次要流必须定义为气体燃料。见14.3.5节，用非预混燃烧模型模拟煤燃烧。
- 煤和液体燃料的混合燃料系统：在这些模拟中，燃料流必须定义为煤，次要流必须定义为液体燃料。见14.3.5，用非预混燃烧模型模拟煤燃烧。
- 煤燃烧：使用次要流可以更精确地模拟煤燃烧。燃料流必须定义为焦炭，次要流必须定义为煤的挥发分。见14.3.5，用非预混燃烧模型模拟煤燃烧。
- 单一燃料和两个不相似的氧化剂流：在这些模拟中，燃料流定义为燃料，氧化剂流定义为氧化剂中的一种，次要流定义为第二种氧化剂。

！　使用次要流会大大增加模拟的计算时间，因为在运行时间上FLUENT中要执行多维PDF积分。

选择绝热或非绝热（Choosing Adiabatic or Non-Adiabatic Options）

如果FLUENT里的问题定义中包含下列情况一个或一个以上，应该使用非绝热模拟：

- 辐射或墙传热
- 拥有不同温度的多燃料流入口

- 拥有不同温度的多氧化剂入口
- 废气循环
- 液体燃料，煤颗粒，和／或对惰性粒子的传热

注：绝热模型是一个包含二维查询表的简单模型，在查询表中，标量仅依赖于 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$（或依赖于 f_{fuel} 和 p_{sec}。如果模型定义为绝热，将需要在FLUENT中解焓方程，系统温度将直接通过混合分数和燃料温度和氧化剂入口温度确定。非绝热情况将更复杂一些，在计算上更费时，需要在prePDF小红产生三维查询表。然而，非绝热模型选项允许包括上面所描述反应系统的类型。

在“Define Case” 面板中的“Heat transfer options”下选择绝热“Adiabatic”或非绝热“Non-adiabatic”。

使用绝热计算来决定非绝热模型的输入 （Using the Adiabatic Calculation to Determine Inputs to the Non-AdiabaticModel）

即使FLUENT模型将最终需要包括非绝热效应，也会受益于在prePDF中用非绝热计算开始分析。这种简单的计算可被用来调整非绝热模型的输入，确定非绝热情况中需要考虑的峰温和确定那种组分重要、那种组分需要考虑。因此，绝热prePDF计算提供一种对系统能帮助开发一种有效的非绝热模型的理解。

选择化学模型 （Choosing the Chemistry Model）

通常，平衡化学模型比化学当量模型更值得推荐。在这种方法中，感兴趣的组分浓度用化学平衡的假设由混合分数来确定（见14.1.2节）。使用这种模型，能包括中间组分和离解反应效应，在燃烧模型中产生更真实的火焰温度预测。相反，化学当量反应（mixed-is-burned）模拟选项提供精确度低一点的系统化学反应的单步描述。当选择平衡化学反应选项时，将有机会使用部分平衡模型“partial equilibrium”，在第8步里。

在“Define Case”面板中的化学模型“Chemistry models”下选择平衡化学模型“ Equilibrium Chemistry”或化学当量反应“Select or Stoichiometric Reaction”。

！如果想模拟非平衡化学反应，应该用小火焰模拟方法，见14.4节。使用这种模型的顺序见14.4.6节。

为非反应系统选择化学模型（Choosing the Chemistry Model for Non-Reacting Systems）

如果使用非预混燃烧模型来考虑非反应系统，在“Define Case”面板中选择“Stoichiometric Reaction”选项。当准备为每一个组分输入化学当量计算系数时（下面的第七步），简单地为所有组分输入0。

选择PDF分布（Choosing the PDF Shape）

选择的PDF分布将最获得的结果产生一些影响。一般上，默认的 β 函数PDF

分布对f脉动的实验观察比双δ函数匹配得更好，应该第一使用。另一方面，在计算上，双δ函数在prePDF里查询表产生过程中更有效。由于查询表产生是与处理的步骤，双δ函数应该紧用在特殊环境中。当包括次要流时，在prePDF中不选PDF类型。这一步将被取代在FLUENT中发生。

在"Define Case" 面板中的"PDF models"下选择"Delta PDF"或"Beta PDF"。

燃料流的经验定义（Empirical Definition of the Fuel Stream(s)）

经验定义选项为定义燃料或次要流的成分提供了一种替代方法。当不选此项时，将定义在每个流中哪个化学组分是存在的，并定义每一组分的质量或摩尔分数，如下面第五步所述。当用经验定义燃料或次要流时，为流确定化学成分的顺序将有所不同：

1、用"Define Species"面板定义流中存在的化学组分列表（按照下面的建议，第四步）。通过使用经验定义选项，组分选择不变，除了必须包括被用于计算燃料的更低加热值的元素（C，H，N，S和O）和燃烧产物（CO_2和H_2O）。

2、在"Composition"面板（下面第五步）中，不要为每一种组分输入质量或摩尔分数。代替它的是，输入流的原子成分（C,H,N,S和O的原子摩尔分数），它的更低加热值及其平均比热。平热PDF将计算来自这些输入的每一组分的摩尔分数。

一个经验燃料流形成的热由加热值和原子成分来计算。燃料入口温度和燃料比热用于计算显焓（sensible enthalpy）。PrePDF用原子成分和焓完成平衡计算，并返回平衡摩尔组分成分和燃料温度。

注：经验定义选项经和完全化学模型一起用时才可用。不能和化学当量或部分平衡模型一起使用，因为对确定燃料成分，需要平衡计算。如果经验定义燃料是气体燃料，应该意识到与完全平衡系统中与气相燃料入口温度有关的模拟问题（下面第8步）。

对煤燃烧模拟（见14.3.5）或包括气体复杂碳氢混合物的模拟来说，定义经验燃料流尤其有用。因为经验燃料使用完全平衡模型，这将影响到在气相燃料入口处的流体边界条件，因此对气相燃料来说，一般不推荐使用经验定义选项。

在"Define Case"面板中的"Empirically Defined Streams"下打开"Fuel stream"或"Secondary stream"来定义一个经验燃料或次要流。

第四步：定义考虑的化学组分 （Define the Chemical Species to be Considered）

最重要的模拟输入之一就是选择反应系统描述中包括的组分。包括的所有组分必须在化学数据库中存在，必须以数据库里使用的同样的格式输入组分名。当使用非预混模型时，可包括一个组分数的最大值（在"Memory Allocation"面板中输入，见上面第二步）。（注：当有经验定义燃料流时，下面将对定义组分提及其他要求。）

使用"Define Species"面板输入组分数和组分名（图14.3.3）。

Setup→Species→Define…

定义组分步骤如下：

1、在“Species field”中的“Maximum#”中指定要定义的组分数。(可在任何时侯通过增加计数器来改变最大组分数。)

2、在“Database Species”下拉列表中选择定义第一个组分。这个列表包含数据库中组分的完整列表。组分名将出现在“DefinedSpecies”列表中。

3、增加“Species # field”(既可用计数箭头又可打入新值然后按<RETURN>),然后从“Database Species”列表中选择下一个组分。以同样的方式继续直到想要包括的所有组分显示在“Defined Species”列表中。

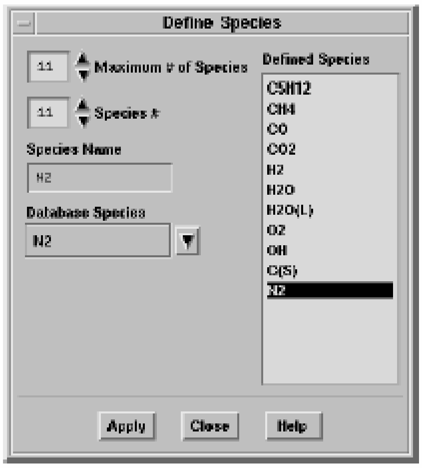


图14.3.3：prePDF中“Define Species”面板

Figure 14.3.3: The Define Species Panel in prePDF

4、当对选择感到满意时，单击“Apply”，关闭面板。

如果需要改变组分选择，在“Defined Species”列表中单击组分名，然后从“Database Species”下拉列表中选择一个新的组分。

为经验定义流选择组分 （Choosing Species for Empirically Defined Streams）

对一个经验定义燃料或次要流，除了组成化学系统的组分以外，必须选择组元。允许的元素是C,H,N,S和O。组分CO_2和H_2O也必须被选上，因为对计算燃料的更低发热（加热）值来说，它们是燃烧产物。如果考虑S（硫），也需要在组分列表中增加SO_2。

包括固体和液体组分 （Including Solid and Liquid Species）

和气体一样，固体和液体组分能被包括在热动力学计算中。他们在组分名后的圆括号中用L或S表示。如果选了固体或液体组分，必须在浓缩组份密度“Condensed Species Densities”面板中定义组分密度（图14.3.4）。

Setup→Species→Density…

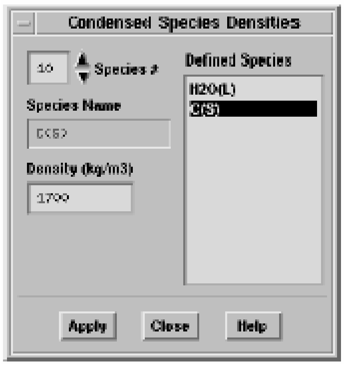


图14.3.4：prePDF中“Condensed Species Densities”面板

Figure 14.3.4: The Condensed Species Densities Panel in prePDF

在面板中，在“Defined Species”列表中选择每一种固体或液体组分然后输入其密度“Density”。注：这个密度应该为浓缩相组分的密度，而不是像FLUENT中定义的粒子的表观密度。例如，在煤燃烧中，应该输入C（s）的密度而不是煤的表观密度。为所有的固体和液体燃料设置完密度时，单击“Apply”并关闭面板。

选择组分到Include 指南 （Guidelines on Choosing the Species to Include）

在简单的烃燃烧中，许多组分和基已经被确认。原则上，尽管能定义包括大量组分的平衡系统，还是应该限定这些最重要组分的系统描述。下列建议可能会在定义化学反应系统中有所帮助：

• 在包括像H，O和OH这样的基的高温火焰（例如，T>2000K）中。这些基在高温离解反应中产生，会对火焰峰温度值产生重大的影响。

• 对重烃燃料（如，燃料油），作为高温分解和气化反应的结果，较轻烃（如，CH_4，C_2H_4）将在富混合物中形成。

• 对煤燃烧，挥发分可能表现为CH_4（或一种重烃）和CO的混合物。煤中的焦炭应该以C(s) 表示。跟着这里概括的其他一般指南确定燃烧系统中应该包括的其他组分。

• 如果对碳黑（soot）形成感兴趣，C(s)可被包括在燃料流定义中。然而，应该注意：平衡模型将不代表通常与碳黑形成有联系的复杂有限率化学反应。

！ 应该小心区分原子碳，C，和固体碳，C(s)。只要正在使用经验定义输入方法，就应该选择原子碳。

• 燃烧产物应该总是包括CO_2和H_2O。另外，也可能会想包括CO和H_2。注：当H_2在水－气转移反应中产生时，不应该单独包括H_2，$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$。

• 如果燃料成分在经验上是已知的（如，$C_{0.9}H_3O_{0.2}$），使用经验定义流选项（见第三步）。

• 对烃燃烧系统，推荐包括C(s)和$H_2O(l)$。

• 如果希望包括烃燃料中可能存在的硫，注意这会干扰平衡求解器的收敛，尤其是如果硫的浓度小时。因此，仅在如果它以可考虑的量存在时，才推荐在计算中包括硫。

模拟硫最简单的方式是把它表示为SO_2和S(l)，其中，SO_2将在富氧混合物中形成，而S(l)将在富燃料混合物中形成。对一个含硫燃料－氧化剂系统

的更为精细的的描述可能包括SO_2，H_2S，COS，S(l)，CS_2和S_2。

组分选择提供了一种系统化学反应的可感觉描述这一点相当重要。如果不是这种情况，平衡计算会收敛失败或者产生不正确的结果。

平衡计算中包含的组分可能应该不包括NO_x组分，因为NO_x的反应率缓慢，不应该用平衡假设来处理。取而代之，用FLUENT NO_x后处理器预测NO_x浓度更精确，在后处理器中包括有有限率动力学。（见17.1节）。注：燃烧模拟包括NO_x并不重要，因为NO_x组分存在浓度低，对燃烧过程几乎没什么影响。

调整数据库 （Modifying the Database）

如果想要在反应系统中包括一种化学数据库中不可用的新组分，可以将其添加到数据库文件THERMO.DB（prePDF）和thermodb.scm（FLUENT使用）中。THERMO.DB的格式在［112］中有详细记录。可以用File/Write/Thermodb…菜单项在prePDF中产生themodb.scm文件。

File→Write→Thermodb…

如果thermodb.scm文件在FLUENT启动目录中，FLUENT将认识这个新组分。为在标准数据库中永久储存该新组分，从产生的thermodb.scm文件中复制该新组分数据到默认的thermodb.scm文件中，如14.5节所述。如果选择了调整标准数据库文件，应该创建原始文件的复制版。

第五步：定义燃料和氧化剂（和次要流）成分 （Step 5: De_ne the Fuel and Oxidizer (and Secondary-Stream) Compositions）

定义完反应系统中考虑的组分后，如果只有一种存在，必须定义燃料和氧化剂入口和次要流入口处组分的摩尔或质量分数。（如果根据经验选择定义燃料或次要流成分，将代替输入该步末尾所描述的参数。）例如，对图14.1.12c的例子，燃料入口有60%CH_4，20%CO，10%CO_2和10%C_3H_8组成。这些信息用成分面板“Composition”输入（图14.3.5）。

Setup→Species→Composition…

定义摩尔或质量分数的顺序如下：

1、在“Stream”下，选“Fuel,Oxideser”或“Secondary”项。

2、在“Specify Compostion In…”下，指明是想输入“Mole Fractions” 还是“Mass Fractions”。

3、从“Defined Species”列表中选择一个组分，然在通过在“Species Fraction”域中选择的流（燃料，氧化剂或次要）里键入其摩尔或质量分数。在“Defined Species”列表中对所有组分重复上述过程，直到已经为选择的流设置了所有的摩尔或质量分数。

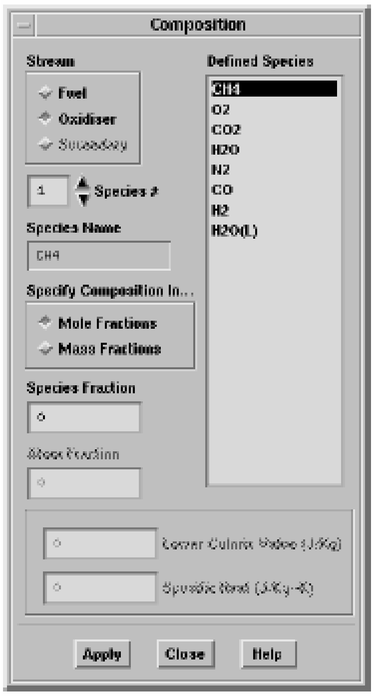


图14.3.5：prePDF中“Composition”面板

Figure 14.3.5: The Composition Panel in prePDF

4、通过选择合适的选项为其他每一个流输入摩尔或质量分数（也就是在第一步中没选的的一个），然后重复第三步。

5、当对所有的设置满意时，单击“Apply”按钮，关闭面板。

可以通过在“Defined Species”列表中选择流和组分名来检查个别流组分的当前设置。

非标准化摩尔或质量分数输入 （Un-Normalized Mole or Mass Fraction Inputs）

如果在定义成分时，输入了非标准化摩尔或质量分数，prePDF将换算输入以便它们统一，并通知（用信息对话框）摩尔或质量分数将被标准化。

为液体燃料定义燃料成分 （Defining the Fuel Composition for Liquid Fuels）

如果考虑从液滴蒸发出来的燃料燃烧，应该在prePDF中定义蒸发的燃料成分。

为煤燃烧定义燃料成分 （Defining the Fuel Composition for Coal Combustion）

如果FLUENT模型中包括煤燃烧，燃料和次要流的成分可用几种方式中的一种输入。可用单一混合分数（燃料流）来代表煤，把燃料成分定义为挥发分和焦炭（固态碳）的混合物。另一种，可用二混合分数（燃料和次要流），分别定义挥发分和焦炭。在煤燃烧的二混合分数模型中，燃料流代表焦炭，次要流代表挥发分。见14.3.5对煤燃烧模拟选项和输入顺序更为详细的描述。

经验定义燃料流成分输入 （Composition Inputs for Empirically-Defined Fuel Streams）

如第三步所提，可以用经验定义燃料流（也就是标准燃料或次要燃料）成分来代替通过指定摩尔或质量分数。对一个经验定义流，将输入原子分数，燃料更

低热（加热）值（燃烧产物假设为水蒸汽和CO_2），和平均燃料的比热。步骤如下：

1、在“Stream”下确保“Fuel（or Secondary”选项可用。

2、在“Defined Species”列表中选择每一个元素并输入其原子分数“Atom Fraction”。

3、输入低热值“Lower Caloric Value”和燃料流比热“Specific Heat of the Fuel (or Secondary) stream”。

4、当对所有设置满意时，单击“Apply”按钮，关闭面板。

燃料成分的平衡修正 （Equilibrium Corrections to Fuel Composition）

注：对所有的平衡选项（也就是当第八步中的燃料富限设为1时），prePDF也将为燃料流输入执行平衡计算（如，在$f=1$）。结果，你会发现如果按你定义的燃料系统不平衡，prePDF将调整你对燃料成分和温度的输入。例如，如果定义的燃料成分为在300K时，0.5CO和0.5CH_4，prePDF将在751K时燃料修正为与平衡成分相一致的0.35C(s)，0.14 CH_4，0.009CO，0.1552CO_2和0.3596H_2。

当用经验定义燃料时，将总是使用平衡计算，因为对这种情况，仅有完全平衡法可用。如果用组分摩尔或质量分数定义燃料，将仅当使用完全平衡选项时才发生修正。如果燃料为液体或固体（煤）燃料，平衡修正将对模型的建立没有任何影响。

！ 对气相燃料，平衡计算对燃料成分和温度的影响是一个重要的模拟问题，即在FLUENT中影响气相燃料入口处的流体边界条件。如果正在模拟气相燃料，并正在使用完全平衡模型或燃料的经验定义，应该回顾一下下面第八步中包括的这一主题的其他信息。

第六步：定义工作条件 （Step 6: Define Operating Conditions）

建立查询表和计算平衡化学模型需要反应系统的热动力工作条件。这些条件用“Operating Conditions” 面板输入（图14.3.6）。

Setup→Operating Conditions…

下面描述每一个输入。记住完成以后单击“Apply”按钮。

Absolute Pressure（绝对压力）：通过最小吉布斯自由能的用来从数据库中和化学平衡计算里提取合适的属性数据。

Min. Temperature（最小温度）：用来确定为产生查询表的最低温度（见图14.2.5）。输入应该与控制域（如，一个入口或墙温度）中期望的最小温度相一致。最小温度应设为低于最小系统温度10—20K。仅当在“Defined Case”面板中选择了“Equilibrium Chemistry”模型时，该选项才可用。

Max. Temperature（最大温度）：用来确定为产生查询表的最高温度（见图14.2.5）。其应设置为高于prePDF为绝热系统计算的预测温度的峰温100K。注：如果峰温输入太低，prePDF对查询表的计算将失败。仅当在“Defined Case”面板中选择了“Equilibrium Chemistry”模型时，该选项才可用。

Inlet Temperature （入口温度）：包括对燃料，氧化剂和次要流入口的温度输入：

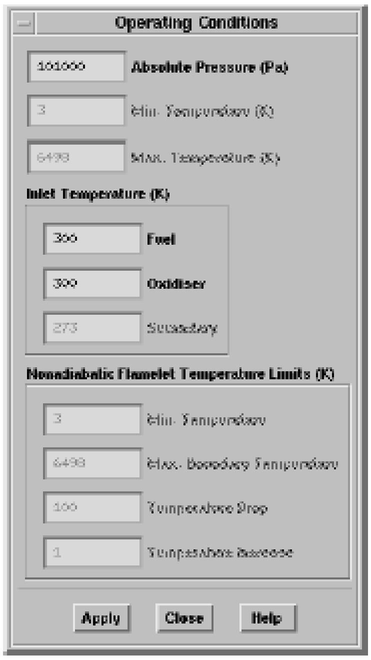


图14.3.6：prePDF中“Operating Conditions”面板

Figure 14.3.6: The Operating Conditions Panel in prePDF

Fuel（燃料）：为模型中燃料入口的温度。在绝热模拟中，这项输入（与氧化剂入口温度一起）决定了将被FLUENT使用的入口流温度。在非绝热系统中，该项输入应该与该将在FLUENT使用的入口热边界条件（尽管在FLUENT部分将再次输入该边界条件）相匹配。如果FLUENT模型使用液体燃料或煤燃烧，将入口燃料温度定义为蒸发／离解开始时的温度（也就是，为离散相材料指定的蒸发温度“Vaporization Temperature”，见19.11节）。对这样的非绝热系统，入口温度将仅在prePDF中用来调整查询表网格（如，为计算查询表的离散焓值）。注：如果有多于一个的燃料入口，并且这些入口拥有不同的温度，则必须定义系统为非绝热的。在这种情况里，应该输入燃料入口温度作为优势燃料入口的值。

! prePDF使用对燃料和氧化剂入口温度来确定燃料和氧化剂焓。当使用完全平衡模型时（富限为1.0），在f＝1处的平衡计算会导致燃料成分和温度被调整。如果正在对一种气体燃料（或如果正使用一种经验定义的气体燃料）使用平衡模型，应该注意燃料温度的这种平衡调整对FLUENT中燃料入口边界条件的影响。见下面第八步。

Oxidiser （氧化）：为模型中氧化剂入口的温度。在燃料流入口温度输入（直接在上面）的讨论中也提出了与该项输入相关的问题。

Secondary（次要）：为模型中次要流入口的温度。（仅当定义了次要流入口时才出现该项）在燃料流入口温度输入（直接在上面）的讨论中也提出了与该项输入相关的问题。

Nonadiabatic Flamelet Temperature Limits （非绝热小火焰温度限制）：包括对非绝热小火焰系统的温度限制的输入。只要正在应用层流小火焰模型而且已经定义了情形为非绝热，就需要这些输入。见14.4.6节小火焰输入的更多信息。

第七步：定义反应化学当量 （Define the Reaction Stoichiometry）

当选择使用化学当量反应（mixed-is-burned）化学模型时，需要反应化学当量输入。如果正使用部分平衡方（定义的富限），也会在富限（见下面）处选择定义系统化学当量。对上面任何一种情况，反应化学当量输入定义为在燃料组分和氧化剂组分之间的一个简单一步反应。例如，考虑下面非常简单的系统：

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

prePDF需要你为这个简单的系统输入摩尔化学当量系数如下：CH_4为1，O_2为2，CO_2为-1，H_2O为-2。注：规定产物化学当量用负数输入。

可使用“Stochiometric Coefficients”面板输入这些系数（图14.3.7）。

Setup→Species→Stochiometry…



图14.3.7：prePDF中“Stoichiometric Coefficients”面板

Figure 14.3.7: The Stoichiometric Coefficients Panel in prePDF

在“Defined Species”列表中选择一种组分并在“Coefficient”中输入其化学当量系数。当为所有的组分都设置了系数时，单击“Apply”，关闭面板。

对燃料混合物的化学当量输入（Input of Stoichiometry for Fuel Mixtures）

如果燃料流由多于一种组分组成，将需要为组和反应输入化学当量。例如，假设燃料由40%（体积）CH_4和60%（体积）CO组成。每一摩尔CH_4需要2摩尔的O_2，每一摩尔CO需要0.5摩尔O_2。因此O_2的摩尔化学当量系数将输入为 $(0.4 \times 2) + (0.6 \times 0.5) = 1.1$。每一种产物的摩尔化学当量将以相似的方式确定。所以最终化学当量为

$$(0.4CH_4 + 0.6CO) + 1.1O_2 \rightarrow CO_2 + 0.8H_2O \qquad (14.3\text{-}1)$$

两种燃料或氧化剂的化学当量输入（Input of Stoichiometry for Partial Equilibrium Calculations）

如14.1.2节所述，当使用平衡化学选项时可以定义混合分数的富限。使用“Solution Parameters”面板完成富限的输入，如下所述。对在此限以上的混合分数，平热PDF将暂停平衡化学计算并根据燃料的混合和在富限处的成分计算成分。当选择部分平衡法时，可让prePDF使用平衡或可以输入在富限处假设的化学当量计算富限处的成分。一般，应通过化学当量系数选择用富限处成分平衡计算，除非有想要代表的实验数据（例如层流小火焰数据）。

第八步：定义查询表创建所使用的参数 （Define Parameters Used in Creation of the Look-Up Table ）

prePDF需要几个用在查询表创建中的输入。这些输入中的几个控制着为将计算的查询表的离散值的数量和分布。使用“Solution Parameters”面板输入这些参数（图14.3.8）。

Setup→Solution Parameters…

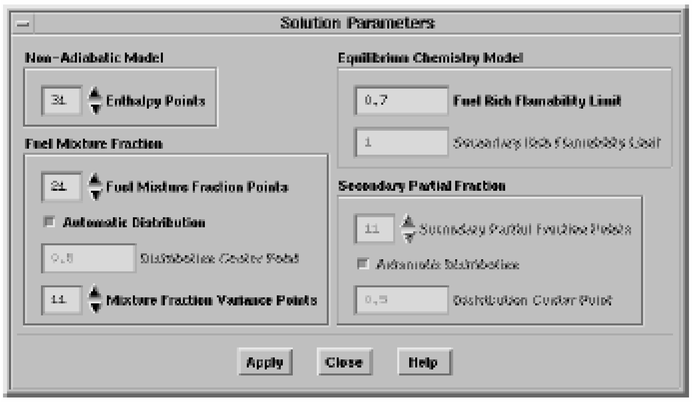


图14.3.8：prePDF中的“Solution Parameters”面板

Figure 14.3.8: The Solution Parameters Panel in prePDF

解参数如下：

Non-Adiabatic Model（非绝热模型）：包含与非绝热法相关的参数。

Enthalpy Points（焓点）：为计算三维查询表上的焓的离散值数。仅在如果模拟非绝热系统时需要这项输入。一般上，应该选择焓点为考虑的混合分数点数的1.5到2倍。默认焓点值为31，对一般模型来说已经足够，也可增加该数（最大到45）。需要的点数将依赖于所考虑的化学系统，在高释热系统（如，烃／氧火焰）需要更多的点数。

Fuel Mixture Fraction （燃料混合分数）：包含与燃料混合分数相管的参数：

Fuel Mixture Fraction Points （燃料混合分数点）：为在将要计算的查询表上的 $\overline{f}$ 的离散值的数量。对一个二混合分数模型，如果在“Species Model”面板上为“Probability Density Function”选择了 β ，这个值也将是FLUENT用来计算PDF的点数（见14.3.3）。增加该点数将产生更精确的PDF分布，但是计算时间将延长。

Automatic Distribution （自动分布）：允许燃料混合分数及其变化量进行自动离散。这个特征通过将离散混合分数值聚集在峰温值周围而使其分布最优。多数情形推荐使用自动分布。

Distribution Center Point （分布中心点）（仅当“Automatic Distribution”不能用时才可用）：决定需要的 $\overline{f}$ 的离散值数的分布。需要的点数将分布在中心点的任何一边，多数点集中在近中心地，少数点在端点上。如果中心点定义为0.5（默认），值将在在范围内均匀分布在0到1之间。一般，应在 $\overline{f}$ 的化学当量值的富边上选择该值。这将会在化学当量范围及以下——在该范围内，计算将更加关键，建立更多的点（因此，会有更好的

解及精度）。$\overline{f}$ 的化学当量值的确定在下面讨论。注：不应将中心点设得高于0.8或低于0.2。

Mixture Fraction Variance Points （混合分数变化量点）：为将要建立的查询表上的 $\overline{f_s'^2}$ 的离散值的数量。混合分数变化量点数应大体上为需要的平均混合分数点数的一半。因为通常沿查询表的 $\overline{f_s'^2}$ 轴变化量比沿 $\overline{f}$ 轴慢，因此需要低解。

Secondary Partial Fraction （次要部分分数）：包含与（可选的）次要部分分数相关的参数：

Secondary Partial Fraction Points （次要部分分数点）：为将要建立的查询表上的 p_{sec} 的离散值数量。像“Fuel Mixture Fraction Points”，如果为一个二混合分数模型在PDF选项上（见14.3.3节）FLUENT将使用次要部分分数点计算PDF。点数越大，给出的PDF分布越精确，单是计算时间越长。

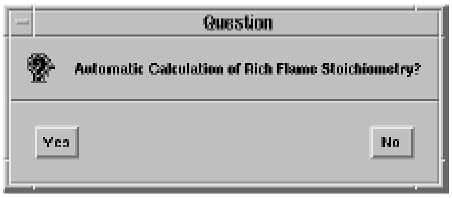
Automatic Distribution （自动分布）：允许对次要部分分数及其变化量进行自动离散。多数情况下推荐使用自动离散。

Distribution Center Point （分布中心点）（仅当“Automatic Distribution”不可用时才可用）：决定了 p_{sec} 离散值的需要数目分布。需要的点数将分布在中心点的任何一边，多数点集中在近中心地，少数点在端点上。如果中心点定义为0.5（默认），值将在在范围内0均匀分布在0到1之间。对一种氧化剂或非反应次要流，应保持该默认值。对次要流，通常应在 p_{sec} 的化学当量值的富边选择该值。这将会在化学当量范围及以下——在该范围内，计算将更加关键，建立更多的点（因此，会有更好的解及精度）。f_{sec} 的化学当量值的确定在下面讨论。所以可用方程14.1-3决定 p_{sec} 的相应值。注：不应将中心点设为高于0.8或低于0.2。

Equilibrium Chemistry Model （平衡化学模型）：包括与平衡化学模型（见14.1.2节）相关的参数。如果已经选择了化学当量模型或已为燃料成分使用了经验定义选项，将不能进行这些设置。

Fuel Rich Flamability Limit （燃料富焰能力限制）：控制着燃料混合分数的平衡计算。富限的值为1.0意味着平衡计算将在混合分数的全范围内进行。当使用低于1.0的富限时，无论何时f或 f_{fuel} 超过该限，平衡计算将暂停。这个“部分平衡”模型在烃类燃烧中是一种有用的方法，允许绕过在富燃料区的烃类燃烧计算。当模型为非绝热加速查询表的准备时，部分平衡的效率将尤其重要。

如果使用低于1.0的富限，prePDF将询问是否想要在富限处定义反应化学当量或是否向让程序使用平衡化学计算富限成分：



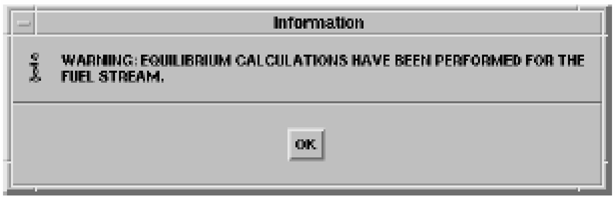
如果选择自动计算，prePDF将使用平衡计算确定在富限处的成分。如果不选择自动计算，必须使用“Stoichiometric Coefficients”面板在富限处输入摩尔化学当量（见上面第七步）。

Secondary Rich Flamability Limit （次要富焰能力限制）：控制次要混合分数的平衡计算。如果次要流步是燃料，应保持默认值1.0。对一个次要燃料流，可考虑调整该值来使用部分平衡模型。富限值为1.0意味着将在混合分数的全范围内进行平衡计算。当输入一个低于1.0的富限时，无论何时 f_{sec} 超过该限，平衡计算将暂停。（注：这里用的是次要混合分数 f_{sec}，而不是部分分数 p_{sec}。）见上面的“Fuel Rich Flamability Limit”获取详细信息。

燃料富混合物的平衡计算 （Equilibrium Calculations in Fuel Rich Mixtures）

实验研究和回顾［23，213］表明尽管燃料使火焰区域倾向于接近热动力平衡，但是在燃料富裕的条件下化学动力学将占优势。因此，当为非经验定义燃料使用prePDF时，强烈推荐部分平衡模型。 如上所述，这种方法暂停了富混合物的平衡计算。（下面给出如何设置富限值。）

如果正使用完全平衡法（富限为1或经验定义燃料），应该明白prePDF将为燃料（如在f＝1处）执行一个平衡计算。在多数情况下，计算的结果平衡燃料成分和温度与定义燃料时的初始输入不一样。这表明：如你所定义的燃料成分和温度没在平衡条件下。当prePDf调整燃料成分和温度到新的平衡值时，你将收到一个警告信息：



该警告的目的是警告你燃料入口温度和成分应被调整为新的平衡值。这个信息将影响你如何在FLUENT中定义气体燃料入口边界条件，如下，因此它很重要。

在FLUENT中新的平衡燃料温度和成分在气相燃料入口边界上定义燃料密度。为保持想得到的燃料质量流率，应用这个平衡密度计算合适的入口速度。可在prePDF中用“VIEW-ALPHA/DENSITY”文本命令在最终离散F-Mean点（f=1）确定平衡燃料密度。在非绝热系统中，应使用的密度为在焓片与燃料入口温度相一致上。如果燃料入口温度等于在prePDF中的“Operating Conditions”面板上输入的温度，应该检查绝热焓片上的密度。如果有不同温度的多燃料入口，可在每一个温度下执行一个绝热计算以确定平衡密度。

！ 尽管prePDF将为燃料计算一个新的平衡温度，当在FLUENT中定义气相燃料入口时也应该使用原始的prePDF燃料入口温度输入。FLUENT用这个原始的非平

衡燃料温度计算入口燃料焓。（该焓与在prePDf平衡计算中使用的一样。）根据该入口焓，FLUENT将确定在燃料入口处的平衡温度，成分和密度。

如果正在使用离散相模型模拟液体或煤燃料，调整的平衡燃料温度和成分不会对在FLUENT中的输入产生影响。

确定混合分数的化学当量和富限值（Determining the Stoichiometric and Rich Limit Values of Mixture Fraction）

确定混合分数的富限值是在“Sloution Parameters”面板中输入的一个重要部分。一般上，应该选则富限为化学当量混合分数的1.5～2倍：

$$f_{rich} \approx 2.0 f_s \qquad (14.3\text{-}3)$$

反过来，化学当量混合分数可有空气对燃料的质量比来计算，如14.1.2节所述（方程14.1-10）。换过来，可通过检查prePDF为绝热系统预测的瞬时温度对混合分数来估计化学当量混合分数。最高温度将发生在靠近绝热混合分数的地方。

在空气中甲醇的燃烧为如何能计算化学当量混合分数提供了一个例子。根据摩尔化学当量写出写出反应为

$$CH_3OH + 1.5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 5.64N_2 \qquad (14.3\text{-}4)$$

为计算化学当量混合分数，首先根据化学当量空气－燃料比r和等价率ϕ按质量基础写出反应。反应变为

$$\varphi CH_3OH + r(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow (\varphi + r)\text{Products} \qquad (14.3\text{-}5)$$

式中：r=6.435。用方程14.1-10，化学当量混合分数（$\phi = 1.0$）就为

$$f_s = \frac{\phi}{\varphi + r} = \frac{1}{7.435} = 0.134 \qquad (14.3\text{-}6)$$

在$\phi = 2.0$时，燃料富混合分数为

$$f_{rich} = \frac{2}{8.435} = 0.237 \qquad (14.3\text{-}7)$$

简单地用方程14.3-4展现一个更一般的形式，这个练习可直接扩展到含烃混合物的燃料。例如，考虑一个包含60％CH_4和40％CO的燃料－空气系统：

$$(0.6CH_4 + 0.4CO) + z(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + yH_2O + 3.76zN_2 \qquad (14.3\text{-}8)$$

在平衡该方程并解出z后，可计算空气－燃料质量比，然后计算如上所述的化学当量混合分数。

次要流富限值 （Rich Limit Values for Secondary Streams）

如果次要流为氧化剂或惰性物质，次要流的富限应该设为1。如果是次要燃料，应用上面的单一燃料系统分析，因为根据次要混合分数$f_{\sec}$（不是次要部分分数$p_{\sec}$）定义了次要富限。

第九步：保存输入　（Save Your Inputs）

当完成所有预计程序时，应保存输入到一个　“input”文件：

File→Write→Input…

这个文件包含所有在prePDF中定义反应系统的输入。可选择保存成二进制（非格式化的）文件或一个格式化的（ASCⅡ，或文本）文件。可以读或编辑格式化文件，但是格式化文件比同样以二进制格式存储的文件需要更多的存储空间。二进制文件占用比较少的空间并能被prePDF快速读些，但是不能在所有机器类型间转移。

第十步：计算查询表　（Compute the Look-Up Tables）

保存完输入后，应使用prePDF开始查询表计算：

Calculate→PDFTable

PrePDF为单一混合分数计算执行的计算以方程14.1-17（或14.1-26）的离散积分结束，如图14.1.9（或图14.1.10）所表示。对二混合分数计算，prePDF将使用方程14.1-28或其绝热等价来计算物理属性。对简单系统，这些计算仅会花费一小会儿时间，但是对于复杂系统（如有10种或更多组分的非绝热系统）将会花费一小时之多。当计算进行时，平热PDF报告进程。下面为一个绝热、单一混合分数计算的简单输出：

```
(*)- INITIALIZING AT ADIABATIC ENTHALPY LINE

................ADIABATIC CALCULATION.......................
 POINTS    TO-GO    EQUILIBRIUM            DELTA-PDF
     0      375
    16      359     T(K) = 2004.   F-MEAN = 0.04  F-VAR = .000
    17      358     T(K) = 1386.   F-MEAN = 0.04  F-VAR = .018
    18      357     T(K) = 1108.   F-MEAN = 0.04  F-VAR = .036
    19      356     T(K) = 1053.   F-MEAN = 0.04  F-VAR = .040
    20      355     T(K) = 1053.   F-MEAN = 0.04  F-VAR = .040
    21      354     T(K) = 1053.   F-MEAN = 0.04  F-VAR = .040
     .
     .
     .
   356       19     T(K) =  467.   F-MEAN = 0.96  F-VAR = .040
   357       18     T(K) =  467.   F-MEAN = 0.96  F-VAR = .040
   358       17     T(K) =  467.   F-MEAN = 0.96  F-VAR = .040
   359       16     T(K) =  467.   F-MEAN = 0.96  F-VAR = .040
   360       15     T(K) =  467.   F-MEAN = 0.96  F-VAR = .040
     .
     .
     .
(*)- CALCULATION SUCCEEDED
```

在指定混合分数点数处完成平衡计算后，prePDF报告计算成功。产生的查询表为如图14.2.3阐明的形式（或图14.2.5，对非绝热系统）。这些查询表可在prePDF中用可用的图形工具绘制出来，如下面第十二步所述。

注：在非绝热计算中，报告包括关于当前考虑的焓点信息：

```
(*)- INITIALIZING ENTHALPY AT TEMPERATURE LIMITS


.................NON-ADIABATIC CALCULATION.....................
POINTS  TO-GO  H-POINT EQUILIBRIUM            DELTA-PDF
    0   15375
    8   15367     8    T(K) =   298.  F-MEAN = 0.00  F-VAR = .000
    9   15366     9    T(K) =   334.  F-MEAN = 0.00  F-VAR = .000
   10   15365    10    T(K) =   888.  F-MEAN = 0.00  F-VAR = .000
   11   15364    11    T(K) = 1391.  F-MEAN = 0.00  F-VAR = .000
   12   15363    12    T(K) = 1869.  F-MEAN = 0.00  F-VAR = .000
   13   15362    13    T(K) = 2334.  F-MEAN = 0.00  F-VAR = .000
   14   15361    14    T(K) = 2792.  F-MEAN = 0.00  F-VAR = .000
   15   15360    15    T(K) = 3243.  F-MEAN = 0.00  F-VAR = .000
```

注意到：当TO-GO下列表点数为0时，非绝热计算停止。这是因为在混合分数等于0处的最终计算不包括多变化量点。

对于二混合分数计算，prePDF在计算过程中将打印下列信息：

```
(*)- INITIALIZING AT ADIABATIC ENTHALPY

..........ADIABATIC CALCULATION / SECONDARY STREAM.............
 POINTS    TO-GO   EQUILIBRIUM              PROGRESS-VARIABLES
     0      725
     1      724    T(K) =   600.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.000
     2      723    T(K) = 1134.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.014
     3      722    T(K) = 1622.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.029
     4      721    T(K) = 2064.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.045
     5      720    T(K) = 2357.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.062
     6      719    T(K) = 2216.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.081
     7      718    T(K) = 1954.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.100
     8      717    T(K) = 1690.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.121
     9      716    T(K) = 1432.  F-FUEL = 0.000  P-SECND = 0.143
```

产生的查询表有如图14.2.4（或图14.2.6对非绝热系统）所释的形式。这些查询表在prePDF中可用可用的图形工具绘制出来，如下所述。

对非绝热计算，当前焓点将被表示为上面列出对非绝热单一混合分数计算的简单输出。

PrePDF的稳定性问题 （Stability Issues in prePDF）

复杂的化学反应或非绝热效应会使平衡计算花费更长的时间并且更困难。在一些情形下，平衡计算甚至会失败。使用下列技术之一就会有可能消除所遇到的任何困难：

- 试一下作为绝热系统计算。绝热系统计算通常非常直接并能提供变量纠正这一对非绝热计算重要输入。可确定那些组分对反应系统重要并除去那些不重要的组分。这些信息可通过绝热计算产生的查询表的简单观察获得。选择合适的温度范围和包括化学组分的合适列表将会大大简化非绝热计算。通过对第八步所描述的富定点限更好选择并调整混合分数中心点以更充分的捕获绝热温度曲线。
- 试着减少考虑的组分数。简化反应系统模型。如果系统包括重烃，确保在系统中包含基本烃如CH_4。

对以使用经验燃料法定义的固体或重液体燃料会有其他的稳定性出现。会发现对富燃料混合物平衡计算产生出非常低的温度并最终失败。这表明正发生强烈的吸热反应，混合物不能维持燃烧。在这种情形下，会需要增加燃料加热值直到prePDF产生可接受的结果。提供燃料将被作为液体或固体（煤）燃料处理，则能在FLUENT模拟中维持期望的加热值。这一点通过定义在期望加热值与调整加热值间的差作为潜伏热（在燃烧固体燃料的情形中）或裂解热（在液体燃料的情

形中）实现。

PrePDF计算值报告的信息和错误 （Informational Messages and Errors Reported During the prePDF Calculation）

当prePDF计算平衡化学并产生查询表时，会报告错误信息和消息报告。这些信息在14.3.2节详细描述。

第十一步：保存查询表 （Save the Look-Up Tables）

prePDF计算的查询表用一个文件储存将并读入FLUENT。FLUENT将使用该表从prePDF预测的混合分数场中提取组分、密度和温度场作为流场计算的一部分。退出prePDF前必须保存查询表。

File→Write→PDF…

文件既可为FLUENT4又可为FLUENT6以格式化（ASCⅡ，或文本）或二进制（非格式化）保存。

！ 确保为合适的求解器保存PDF文件。

除了将PDF文件读入FLUENT作为流动分析外，如果想使用下面第十二步描述的图形工具检查该查询表，可在稍后将其读回prePDF。（所有PDF文件类型均可被读回prePDF。）

第十二步：prePDF图形和文字数字报告 （Graphics and Alphanumeric Reports in prePDF）

prePDF提供许多允许检查查询表计算结果的应用程序。

观察β PDF形状 （Reviewing the Beta PDF Shape）

可使用“Beta-Pdf”面板绘制β-PDF形状（图14.3.9）。

Dispaly→Beta PDF…



图14.3.9：平热PDF中“Beta-Pdf”面板

Figure 14.3.9: The Beta-Pdf Panel in prePDF

这个应用程序为在面板中定义的任何$\overline{f}$（平均混合分数）和$\overline{f'^2}$（混合分数变化量）简单地绘制函数，方程14.1-22。图14.1.7阐明了β-PDF形状会产生的许多形式中的两种。注：对于一对给定的$\overline{f}$和$\overline{f'^2}$，在prePDF中没有一个输入会改

变β-PDF形状。（由于β-PDF图仅为一般信息目的，甚至当正在计算为在FLUENT中将计算PDFs的二混合分数问题时时可绘制β-PDF图。）

在绝热单一混合分数系统中观察瞬时值 （Reviewing Instantaneous Values in Adiabatic Single-Mixture-Fraction Systems ）

可使用“Property Curves”面板绘制瞬时组分浓度，密度或温度随瞬时混合分数的变化（图14.3.10）。

Display→PropertiyCurves…

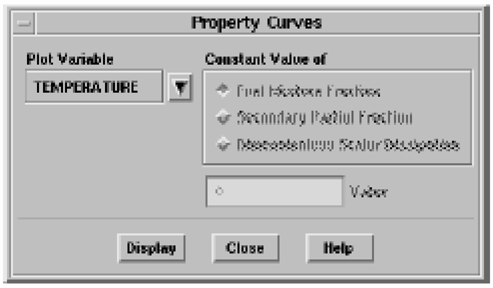


图14.3.10：prePDF中“Adiabatic Property Curves”面板

Figure 14.3.10: The Adiabatic Property Curves Panel in prePDF

可以在“Plot Variable”下拉列表中选择温度，密度，组分，或焓作为被绘制的变量。显示结果表明这些量如何随混合分数变化并可用来确定混合分数的化学当量值，预期的峰温和系统中最重要的组分。图14.3.11和14.3.12显示了一个非常简单烃系统得来的瞬时值。

对绝热系统，也可以FLUENT 中XY绘图器使用的格式将属性数据写入一个文件。用prePDF中“WRITE-XY-FELE”文本命令写入包含属性数据的XY plot 文件：

VIEW-GRAPHICS→PROPERTY-CURVES→WRITE-XY-FILE

当选择了该命令，将被询问选择写入属性并指定文件名：

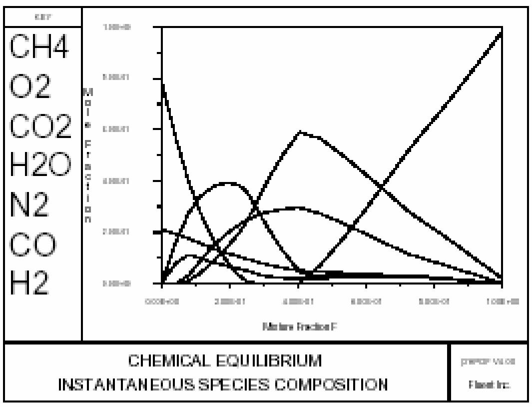


图14.3.11：由平衡化学计算得来的瞬时组分摩尔分数

Figure 14.3.11: Instantaneous Species Mole Fractions Derived From the Equilibrium Chemistry Calculation

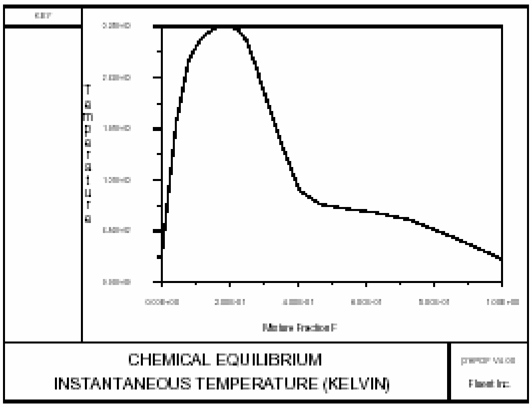


图14.3.12：由平衡化学计算得来的瞬时温度

Figure 14.3.12: Instantaneous Temperature Derived From the Equilibrium Chemistry Calculation

```
COMMANDS AVAILABLE FROM PROPERTY-CURVES:
   PLOT             WRITE-XY-FILE        QUIT
(PROPERTY-CURVES)-
wxy

COMMANDS AVAILABLE FROM WRITE-XY-FILE:
   TEMPERATURE    DENSITY        SPECIES      ENTHALPY
   QUIT
(WRITE-XY-FILE)-
te
ENTER NAME OF XY PLOT FILE
(S)- DEFAULT- sample.xy
```

最后，在FLUENT部分，可以使用“File XY Plot”面板读入并绘制该数据。
Plot→File…

观察绝热二混合分数系统中的瞬时值 （Reviewing Instantaneous Values in Adiabatic Two-Mixture-Fraction Systems）

如果问题包括次要流，除了选择绘制的变量之外，还必须指定一个属性曲线应被绘制在的燃料混合分数或次要部分分数的常数值，在“Constant Value”下选择任意一个混合分数并指定其“Value”。被选择的变量将作为不拥有常数的分数的函数被绘制。在图14.3.13中，次要部分分数拥有常数0.05，其显示了温度如何随燃料混合分数变化。

观察非绝热系统的瞬时值 （Reviewing Instantaneous Values in Non-Adiabatic Systems）

如果一个单一混合分数系统是非绝热的，仍可观察瞬时标量值随瞬时混合分数的变化。在非绝热的情况中，因为瞬时结果依赖于平均焓值，将指定变量将被显示的平均混合分数，其变化变量和平均焓值。“Property Curves”面板（图14.3.14）包含需要在非绝热系统中输入这些参数的场。

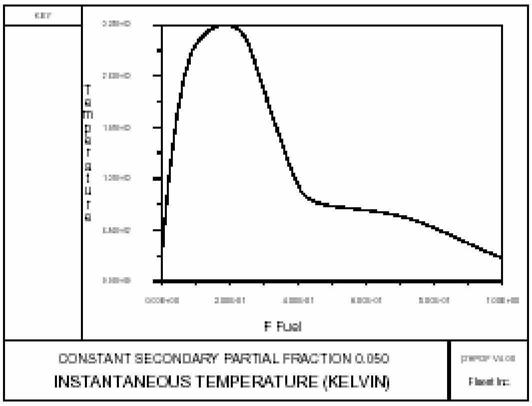


图14.3.13：为一个二混合分数例子绘制的瞬时温度

Figure 14.3.13: Instantaneous Temperature Plotted for a Two-Mixture-Fraction Case

Display→Property Curves…

用“Plot Variable”下拉列表选择温度，密度，组分质量分数或焓作为绘制的变量。然后，在显示被选择的变量处输入平均混合分数“Mean Mixture Fraction”，混合分数变化变量“Mixture Fraction Variance”和平均焓“Mean Enthalpy”。单击“Display”产生图形。

！　注：对非绝热二混合分数情况，不能绘制瞬时属性曲线。将使用“Nonadiabatic－Table”面板来代替绘制瞬时值的查询表。

！　注：　“Property Curves”对绝热和非绝热情况的显示中有下列重要区别。对绝热，瞬时属性曲线与在 $\overline{f_s''^2} = 0$ 时查询表中的值相一致。然而，在非绝热系统中，属性曲线仅代表优先于PDF积分的属性的中间值，因此，不与PDF查询表中任何值相一致。为了对非绝热情形检查储存在查询表中的值，应该使用“Nonadiabatic-Table”面板。

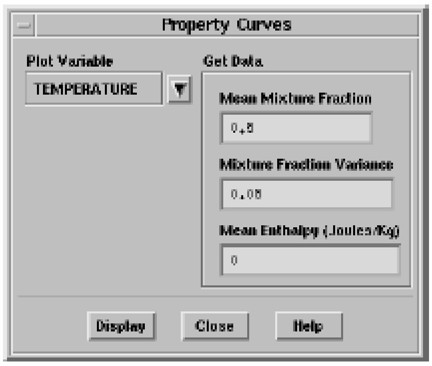


图14.3.14：prePDF中“Non-Adiabatic Property Curves”面板

Figure 14.3.14: The Non-Adiabatic Property Curves Panel in prePDF

观察prePDF为单一混合分数计算的二维查询表　（Reviewing the 2D Look-Up Tables Computed by prePDF for a Single Mixture Fraction）

既可使用图形又可使用文字数字形式来显示为单一混合分数绝热系统产生的二维查询表。使用“Pdf-Table”面板绘制表（图14.3.15）。

Display→PDF Table…

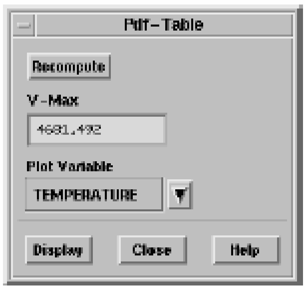


图14.3.15：prePDF中“Pdf-Table“面板

Figure 14.3.15: The Pdf-Table Panel in prePDF

使用“Plot Variable”下拉列表，可为温度，密度或任何单个组分分数（在当选择“SPECIES”出现的“Species Selection”面板中定义）显示查询表。图14.3.16为用简单烃燃烧模型为温度产生的查询表。类似地，可使用“VIEW-ALPHA“命令，文本界面可用，在离散平均 / 变化变量矩阵中每一点上以列表形式来显示查询表：

Main→VIEW-ALPHA

```
VIEW ALPHA:  TEMPERATURE (K)
 F-VAR   F-MEAN=  1        2        3        4        5
  15         1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03
  14         1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03
  13         1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03
  12         1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03
  11         1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03  1.5E+03
   .
   .
   4         1.5E+03  1.6E+03  1.7E+03  1.7E+03  1.8E+03
   3         1.5E+03  1.6E+03  1.7E+03  1.8E+03  1.9E+03
   2         1.5E+03  1.7E+03  1.8E+03  2.0E+03  2.1E+03
   1         1.5E+03  1.8E+03  2.1E+03  2.4E+03  2.7E+03
```

观察prePDF为二混合分数计算的二维查询表 （Reviewing the 2D Look-Up Tables Computed by prePDF for Two Mixture Fractions）

！　在prePDF中观看温度和组分表以保证它们被解得恰当但又不过多很重要。不恰当的解将导致错误，而过多的解将在FLUENT中导致解的时间的不必要减慢。

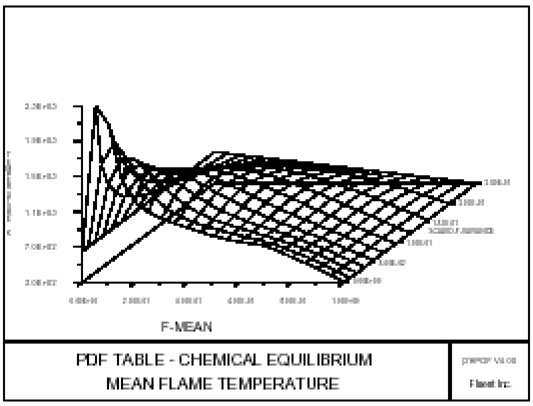


图14.3.16：平热PDF为一个单一烃系统（单一混合分数，绝热）产生的温度二维查询表

Figure 14.3.16: Two-Dimensional Look-Up Table for Temperature Generated by prePDF for a Simple Hydrocarbon System (Single-Mixture-Fraction, Adiabatic System)

既可用图形又可用文字数字形式显示为二混合分数绝热系统产生的瞬时属性的二维查询表。使用“Property-Table“面板绘制表：

Display→Property Table…

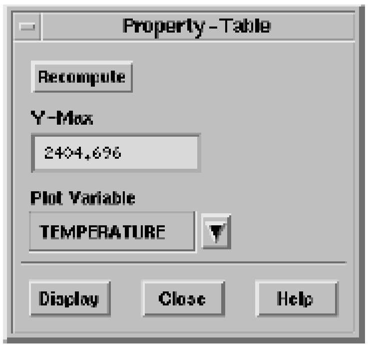


图14.3.17：“Property-Table”板

Figure 14.3.17: The Property-Table Panel

将如上面为“Pdf-Table”面板所讲的正确使用该面板，但是结果图将显示选择作为瞬时燃料混合分数和次要部分分数函数（代替作为平均燃料混合分数和变化变量）的变量。

对于单一混合分数计算，文字数字形式报告以同样的方式产生，但是该报告代替平均 / 变化变量矩阵而列出 f_{fuel}， $p_{\sec}$ 点。

VIEW ALPHA: TEMPERATURE (K)

P-SEC	F-FUEL= 1	2	3	4	5
7	1.954E+03	1.773E+03	1.593E+03	1.420E+03	1.273E+03
6	2.216E+03	2.020E+03	1.824E+03	1.631E+03	1.442E+03
5	2.357E+03	2.263E+03	2.065E+03	1.845E+03	1.638E+03
4	2.064E+03	2.339E+03	2.279E+03	2.059E+03	1.836E+03
3	1.622E+03	2.043E+03	2.339E+03	2.267E+03	2.032E+03
2	1.134E+03	1.630E+03	2.071E+03	2.357E+03	2.225E+03
1	6.000E+02	1.180E+03	1.696E+03	2.145E+03	2.366E+03

为单一混合分数非绝热系统观察三维查询表 （Reviewing the 3D Look-Up Tables for Single-Mixture-Fraction Non-Adiabatic Systems）

为单一混合分数非绝热系统产生的查询表包含作为三个量：平均混合分数，混合分数变化变量和平均焓的函数的平均温度、密度和组分浓度。因此，当请求以文字数字形式或图形形式显示查询表时，将将他们一片挨一片的显示。用“Nonadiabatic-Table”面板开始图形显示（图14.3.18）。

Display→Nonadiabatic-Table⋯



图14.3.18：prePDF中“Nonadiabatic-Table”面板

Figure 14.3.18: The Nonadiabatic-Table Panel in prePDF

在该面板中，可在“Plot Variable”下拉列表中选择被绘制的变量。接着，

必须定义如何切查询表中可用的数据点的三维排列：那个离散独立变量（既可是 $\overline{f}$ 又可是 $\overline{H^*}$ ）被保留常数，和该常数值是否被选择为一个数值（选择“Value”作为“Plot”类型）或是否通过离散化索引（选择“Slice”为“Plot”类型）选择。如果选了或一种方法，单击“Slice…”按钮来选择想要的离散化索引。



图14.3.19：prePDF中“Slice”面板

Figure 14.3.19: The Slice Panel in prePDF

在“Slice”面板中（图14.3.19），选择那个变量（焓Enthalpy或f的平均F-Mean）为常数，然后拾取“Slice＃”（离散化索引）。例如，在如14.3.19的面板中，已经请求了在平均焓的第十个离散值处产生的查询表。如14.2节所讨论，每一个片实际上与一个标准热损或吸热相一致。与绝热系统相一致的焓片索引在“Adiabatic Slice＃”域中显示。

产生标绘图，单击“Apply”然后关闭“Slice”面板，然后单击在“Nonadiabatic-Table”面板里的“Display”。图14.3.20为一个简单的标绘图。

作为选择，会想根据独立量之一的指定值定义一个三维查询表片。当事该种情况时，在“Nonadiabatic-Table”面板中的“Plot type”下选择“Value”选项。设置片，单击“Value…”按钮打开“Lookup Points”面板（图14.3.21）。

在该面板中，可选择一个与下列相一致的三维表片段：

- 平均焓的常数值（焓值Enthaipy Values和常数焓选项“Constant Enthalpy” option）

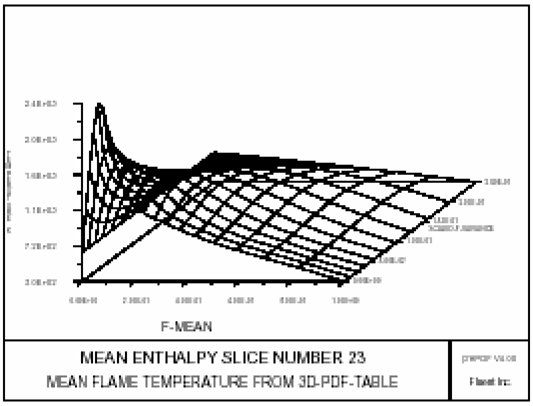


图14.3.20：在非绝热系统（单一混合分数）中三维查询表的一个单一片断显示

Figure 14.3.20: Display of a Single Slice of the Three-Dimensional Look-Up Table in a Non-Adiabatic System (Single Mixture Fraction)

- 平均混合分数的常数值（Constant F-Mean Value）

●绝热焓（Enthalpy值和Adiabatic Relationship选项）

另外，在“Value”域中提供被选择量的物理值。当选中绝热焓选项时，必须提供燃料“Fuel”和氧化剂“Oxidiser”入口温度来代替固定值。PrePDF使用该信息来构造用于切割表的焓与混合分数间的绝热关系。绝热焓选项非常有用，因为它允许你为来自非绝热系统产生的3D查询表的燃料和氧化剂入口温度的不同组合产生绝热（2D）查询表。

最后，可设置细化因子“Refinement Factor”，它决定了绘制曲线的解。细化因子为1.0（默认）意味着标绘图将使用同样的在“Solution Parameters”面板中要求的离散点数。增加该因子将会引起平热PDF去计算和显示额外的数据点，产生一个更光滑的标绘图，但是需要一些时间来计算。

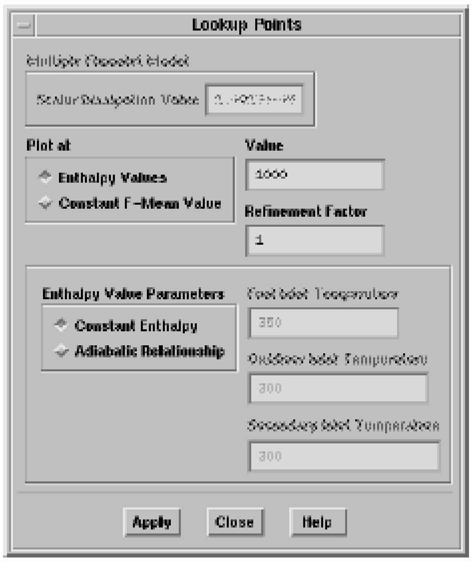


图14.3.21：prePDF中“Lookup Points”面板

Figure 14.3.21: The Lookup Points Panel in prePDF

产生标绘图，单击“Apply”，关闭“Lookup Points”面板，然后单击“Nonadiabatic-Table”面板中的“Display”。

为二混合分数非绝热系统观察三维查询表（Reviewing the 3D Look-Up Tables for Two-Mixture-Fraction Non-Adiabatic Systems）

为二混合分数非绝热系统产生的查询表包含作为三个瞬时量：燃料混合分数，次要部分分数和焓的函数的瞬时温度，密度和组分浓度。至于上面描述的单一混合分数情形，将使用“Nonadiabatic-Table”面板显示查询表。除了仅可选择焓片或显示查询表上的值外，顺序与上面描述的完全一样。

14.3.2 prePDF报告的提示信息和错误 （Informational Messages and Errors Reported by prePDF）

在事件建立、查询表计算或后处理过程中，prePDF可能会分布下列信息。这里详细列出了所有信息来源和需要的动作。

```
BOTTOM TEMPERATURE TOO HIGH
```

来自：求解器Solver
原因：为非绝热计算定义的最低温度比入口温度要高。
动作：纠正最低温度值。

```
CALCULATIONS INTERRUPTED
CONTINUE ? (ELSE RETURN TO MAIN MENU)
```

来自：求解器Solver
原因：按下了“Ctrl-C”
动作：键入N将使求解器中止主菜单而且将丢失所有先前的平衡迭代。键入“Y”或RETURN将使计算继续。

```
ENTHALPY CURVE GENERATION FAILED
```

来自：图形Graphics
原因：对非绝热单一混合分数情形，prePDF不能构造为计算瞬时属性曲线需要的瞬时焓曲线。
动作：调整为绘制属性曲线图的混合分数，变化变量或焓输入。

```
ENTHALPY HIGHER THAN ENTHALPY CEILING
```

来自：图形Graphics
原因：对非绝热单一混合分数情形，为计算瞬时属性曲线的焓输入太高。
动作：减少为绘制属性曲线图的焓值。

```
ENTHALPY LOWER THAN ENTHALPY FLOOR
```

来自：图形Graphics
原因：对非绝热单一混合分数情形，为计算瞬时属性曲线的焓输入太低。
动作：增加为绘制属性曲线图的焓值。

```
ERROR: NO ATOMS EXIST TO DEFINE THE EMPIRICAL STREAM
```

来自：建立Setup
原因：已经被选择经验燃料流选项但无已被定义用来构建燃料的元素。允许的元素有C,H,O,S和N。
动作：在组分列表中添加元素C,H,O,S和N。

```
ERROR: NO CARBON DIOXIDE SPECIES EXISTS
```

来自：建立Setup
原因：已选择经验燃料流选项但还未定义CO_2组分。对从经验燃料的加热值计算经验燃料的生成热来说，CO_2是必须的。
动作：在组分列表中添加CO_2。

```
ERROR: NO WATER VAPOR SPECIES EXISTS
```

来自：建立Setup
原因：已选了经验燃料流选项，但还未定义H_2O组分。对从经验燃料的加热值来计算经验燃料的生成热来说，H_2O是必须的。
动作：在组分列表中添加H_2O。

```
ERROR OPENING TEMPORARY LINKING FILE
```

来自：Files或Setup
原因：prePDF不能打开用于热动力学数据临时存储的文件DBLINK 。
动作：确保有在工作目录中写许可。

```
ERROR WRITING TEMPORARY LINKING FILE
```

来自：Files或Setup
原因：prePDF不能写用于热动力学数据临时存储的文件DBLINK。
动作：确保有硬盘空间。

```
FAULT AT STOICHIOMETRIC REACTION CALCULATION FOR F-MEAN = xx
```

来自：Solver
原因：出现下列原因之一就会出现该信息：
- 温度限不足。
- 定义的化学当量不正确。
- 富焰限与自动化学当量计算已被用，并且富焰限的值被设得太低。

动作：检查温度限输入。检查化学当量输入。检查富焰限设置。

```
INCORRECT STOICHIOMETRY DEFINED
```

来自：Solver
原因：定义的化学当量不满足元素平衡。
动作：检查化学当量输入。

```
SETTING UP DATA BASE LINK FILE FAILED
```

来自：Files或Setup
原因：prePDF不能访问热动力学属性数据库。
动作：确保已遵循prePDF安装指南安装并正确设置了所有的环境变量。

```
TOP TEMPERATURE TOO LOW
```

来自：Solver
原因：为非绝热计算定义的最高温度比对该混合物的绝热火焰温度低。
动作：增加最高温度限。推荐设置为$T_{adiabatic}$＋100K。绝热火焰温度$T_{adiabatic}$可通过执行一个绝热计算并观察prePDF预测的瞬时温度对混合分数曲线来计算。

```
UNABLE TO CALCULATE COMPOSITION AT F-MEAN xx AND TEMPERATURE xxxx K
```

来自：Solver
原因：平衡计算失败。可能有下面几个原因：
- 定义的组分列表不恰当。
- 为平衡求解器已输入的条件，混合物为液体。

动作：试着使用更好的温度限。按组分列表实验，使用绝热计算，根据在混合分数范围上形成的总量添加或除去组分。试着移动富焰限更接近化学当量混合分数。

```
UNABLE TO CALCULATE ENTHALPY CURVE AT I-FMEAN = xx J-FVAR = xx K-ENTH = xx
```

来自：Solver
原因：对非绝热计算，prePDF不能构造PDF计算需要的瞬时焓曲线。
动作：该信息应该不出现。联系Fluent雇主获取支持。

14.3.3 FLUENT中非预混模型输入和求解顺序 （Non-Premixed Model Input and Solution Procedures in FLUENT）

对单一混合分数问题和二混合分数问题，在FLUENT中的非预混模型建立和求解顺序略有不同。下面提供每种方法的总体看法。注：FLUENT 的case文件必须始终满足14.1.3节中为非预混模拟法所列的限制。在本节中，提供在FLUENT中关于问题定义和遵循的计算顺序的详细资料。

单一混合分数法 （Single-Mixture-Fraction Approach）

对一个单一混合分数系统，当已经在prePDF中完成混合分数 / PDF查询表的计算时，就准备在FLUENT中开始反应流动模拟。在FLUENT中，将求解流场和预测 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$ （和 $\overline{H^*}$ 如果系统为非绝热或 $\overline{X_{st,d}}$ 如果系统基于层流小火焰）的空间分布。FLUENT将从查询表中获得隐含温度和单个化学组分质量分数。

二混合分数法 （Two-Mixture-Fraction Approach）

当包含次要流时，除了平均燃料混合分数及其变化变量之外，FLUENT将为平均次要部分分数（ $p_{\sec}$ ）及其变化变量求解输运方程。FLUENT将在查询表中为温度，密度和单个化学组分查询瞬时值，为燃料和次要流计算PDF，并为温度，密度和组分计算平均值。

注：　为既避免错误又减慢不必要的计算时间，在prePDF中看看温度和组分表以保证求解充分但又不过分很重要。

第一步：启动FLUENT并读入网格文件 （Start FLUENT and Read a Grid File）

以一般方式启动FLUENT，如1.5节所述，然后读入一个网格文件。模型中入口的数目和类型必须满足非预混模拟方法的限制，如14.2.3节所讨论和图14.1.12，14.1.13和14.1.14所释。

从一个先前的case文件启动非预混计算 （Starting a Non-Premixed Calculation From a Previous Case File）

可为非预混燃烧模拟读入一个预先定义的FLUENT case文件作为起始点。如果该case文件包括与当前非预混燃烧模型矛盾的输入，当打开非预混模型时FLUENT将会警告并将关闭那些矛盾的模型。例如，如果case文件包括的组分与prePDF创建的PDF文件中包括的那些组分不同，这些组分将不能使用。如果case文件中包含与化学数据库中属性数据相冲突的属性描述，这些描述输入将被忽略。

！　见下面第二步，关于由平热PDF早期版本创建的PDF文件的重要信息。

第二步：激活非预混燃烧模型 （Activate the Non-Premixed Combustion Model）

预备 （Preliminaries）

打开非预混燃烧模型之前，必须在“Viscous Model”面板中使紊流计算

（turbulence calculation）可用。

Define→Models→Viscous…

如果模型是非绝热，也应该使传热heat transfer（和辐射radiation，如果需要）可用。

Define→Models→Energy…

Define→Models→Radiation…

图14.1.11阐明了必须处理为非绝热的问题类型。注：然而，包括非绝热的决定在prePDF中完成。如果prePDF输入是为绝热系统的，FLUENT将关掉能量方程。

使非预混燃烧可用 （Enabling Non-Premixed Combustion）

在任何其他模拟输入（如，设置边界条件或属性）前，应该打开非预混燃烧模型，因为激活该模型将影响到在随后的工作中如何请求其他输入。在“Species Model”面板中使非预混燃烧模型可用。

Define→Models→Species…

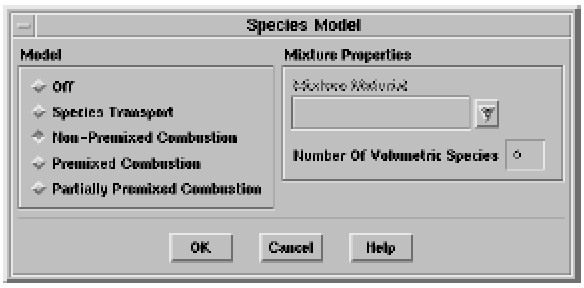


图14.3.22：FLUENT中“Species Model”面板

Figure 14.3.22: The Species Model Panel in FLUENT

在“Model”标题下选择“Non-Premixed Combustion”。当在“Species Model”面板中单击“OK”时，一个“Select File”对话框将立即出现，提示包含prePDF中创建的查询表的名字。（PDF文件为计算完查询表后，在prePDF中使用“File/Write/PDF…”菜单项保存的文件。）FLUENT将指示已经成功读入指定的PDF文件：

```
Reading "/home/mydirectory/adiabatic.pdf"...
read 5 species (binary c, adiabatic prepdf)
pdf file successfully read.
Done.
```

在PDF文件里读入后，FLUENT将通知已经改变了一些材料属性。可接受该通知；稍后将更新属性。

可使用“File/Read/Pdf…”菜单项在任何时侯读入一个改变的PDF文件。

！ 回忆：仅当使用了分离求解器时，非预混燃烧模型才可用；非预混燃烧模型不能与耦合求解器一起使用。也仅当紊流模型在激活状态时，非预混燃烧模型才可用。

如果正在模拟一个非绝热系统并希望包括可压缩性效应，重新打开“Species Model”面板（图14.3.23）并在“PDF”选项下打开“Compressibility Effects”。该项告诉FLUENT从PDF表中更新密度，温度，组分质量分数和焓来说明系统变化的压力。当非预混燃烧模型在激活状态时，可在“Species Model”面板中仅使可压缩性效应可用。对其他模型，将在“Materials”面板中定义可压缩流（理想气体，boussinesq等）。

使用prePDF早先版本创建的PDF文件 （Using PDF Files Created by Previous Releases of prePDF）

由prePDF 1创建的PDF文件不能读入FLUENT或读入prePDF 4（当前版本）。如果有prePDF 1文件，将输入文件读入prePDF 4，重新计算查询表，并存为一个读入FLUENT新的PDF文件。如14.3.5节所注，在prePDF计算PDF查询表前必须修改prePDF 1为煤燃烧系统创建的输入文件。

PrePDF 2创建的PDF文件可读入FLUENT，但是推荐在prePDF中重新计算查询表。在prePDF的这些版本中，当建造PDF表时，混合分数变化变量没按比例调整为其最大值。这导致了一个较低的解表，尤其是对较低混合分数值并且混合分数值在接近0和1处时。为利用更先进的PDF表查询模式，可将一个由prePDF 2创建的PDF或输入文件读入prePDF 4中并重新计算查询表。

PrePDF 2创建的二混合分数PDF文件应读入prePDF 4并写出FLUENT 6格式的文件。（prePDF 2所写的二混合分数PDF文件不能直接读入FLUENT。）

表14.3.1总结了在FLUENT中使用旧版PDF文件的推荐顺序。

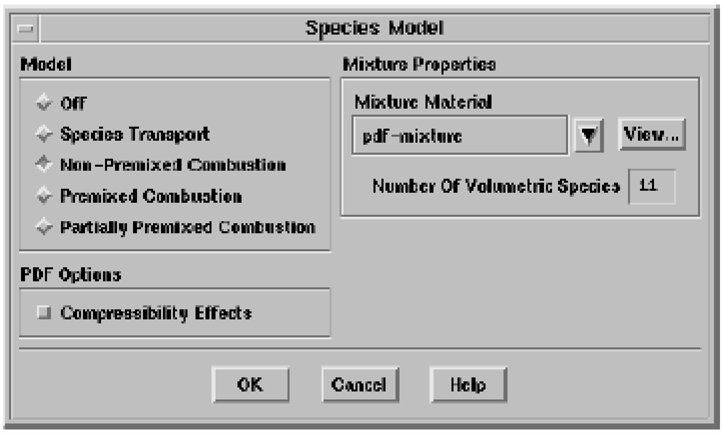


图14.3.23：“Species Model”面板和可用的“PDF Options”
Figure 14.3.23: The Species Model Panel With Available PDF Options

在case文件读取过程中恢复PDF文件 （Retrieving the PDF File During Case File Reads）

PDF文件每被指定给FLUENT仅一次。在那以后，该名字储存在FLUENT case文件中，并且无论何时读该case文件，该PDF文件将被自动读入FLUENT。FLUENT将会在完成读入case文件的其余部分以后，在其在文本（控制台）窗口通过报告其的进程提醒正在读PDF文件。

表14.3.1：在FLUENT中使用旧版PDF文件
Table 14.3.1: Using Old PDF Files in FLUENT

PDF 文件类型	在prePDF 4中是否可读	在FLUENT中是否可读	推荐顺序
prePDF 1	仅输入文件可	否	将输入文件读入prePDF 4，重新计算PDF表，并写为一个FLUENT 6格式的文件。
prePDF 2（单一混合分数）	是	是	将输入或PDF文件读入prePDF 4，重新计算PDF表，并写为一个FLUENT 6格式的文件。

prePDF 2（二混合分数	是	否	将PDF文件读入prePDF 4，并写为一个FLUENT 6格式的文件。
prePDF 3	是	是	PrePDF 3的文件与prePDF 4和FLUENT 6都相容。

注：储存在你的case文件中的PDF文件名可能不包括PDF文件存在的路径全称。仅在如果第一次通过GUI读PDF文件（或如果当使用文本界面时你在路径名中与文件名一起键入）时，路径全称才将被存储在case文件中。在路径全称缺少的事件中，PDF文件的自动读入将失败（因为FLUENT不知道从那个路径访问该文件），将需要手动指定PDF文件。最安全的方法是当第一次读PDF文件时使用GUI或当使用文本界面时提供路径全称。

第三步：定义边界条件 （Define Boundary Conditions）

混合分数边界条件输入（Input of Mixture Fraction Boundary Conditions）

当使用非预混燃烧模型时，入口和出口处的流体边界条件（速度或压力，紊流强度等）以一般方式定义。不需要入口处的组分质量分数。改为定义入口边界上的平均混合分数 $\overline{f}$ 和混合分数变化变量 $\overline{f'^2}$ 的值。（对包括次要流的问题，将为平均次要部分分数及其变化变量也为平均燃料混合分数及其变化变量定义边界条件。）这些输入为将要为这些量解的守恒方程提供边界条件。在边界条件面板上为被选择的入口边界提供入口值（图14.2.24）。

Define→Boundary conditions…

输入“Mean Mixture Fraction”和“Mixture Fraction Variance”（和“Secondary Mean Mixture Fraction”和“Secondary Mixture Fraction Variance”，如果正使用二混合分数）。通常，在流动入口上的平均分数入口值将为1.0或0.0；在燃料流入口上的平均燃料混合分数将为1.0，在氧化剂入口或次要流入口上为0.0；平均次要混合分数在次要流入口上将为1.0，在燃料和氧化剂入口上为0.0。仅在如果正模拟废气循环时（如图14.1.15所释和14.1.2节所讨论），燃料或次要混合分数将位于0.0和1.0之间。在入口边界上的燃料或次要混合分数变化变量一般可赋为0。

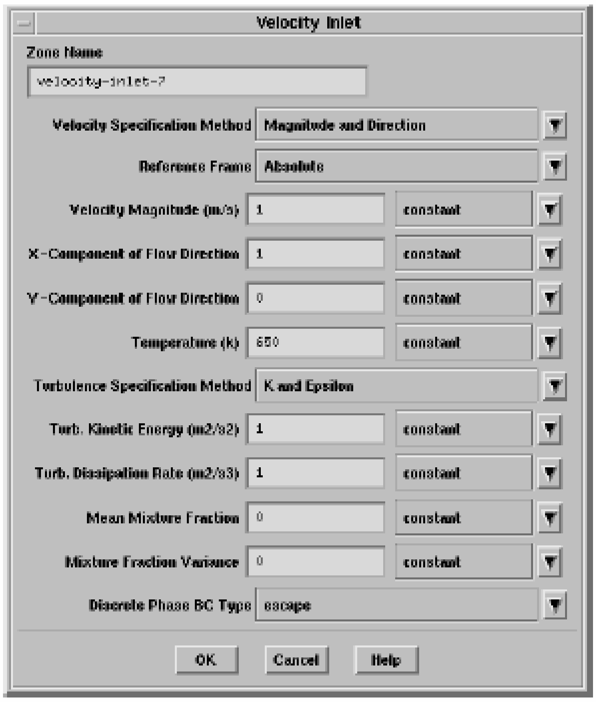


图14.3.24：显示混合分数边界条件的速度入口面板

Figure 14.3.24: The Velocity Inlet Panel Showing Mixture Fraction Boundary Conditions

热边界条件和燃料入口速度输入（Input of Thermal Boundary Conditions and Fuel Inlet Velocities）

如果模型为非绝热，应该自流体入口上输入“Temperature”。当prePDF中需要入口温度时（像在“Operating Conditions”面板上的“Fuel Inlet Temperature”，“Oxidiser Inlet Temperature”，和（如果可应用）“Secondary Inlet Temperature”），这些输入仅被用在构建查询表中。对于在FLUENT中定义的入口温度边界条件与那些在prePDF中的输入略有差别是可接受的。然而，如果入口温度与在prePDF中的值有重大差别，查询表会提供精确较低的插值。这是因为根据prePDF中定义的入口温度来选择查询表中的离散点。

当正使用完全平衡模型（富限为1.0）时，多数情况下prePDF将预测一个修正的平衡燃料温度和成分。如14.3.1节所述，在气相燃料入口处的入口速度应根据与这个修正的温度和成分相一致的密度定义。然而，在气相燃料入口处的温度，应保持在prePDF中用来定义燃料入口的值。在不寻常的环境中，在氧化剂入口会发生类似的平衡调整，输入应以相同的方式确定。

对非绝热非预混燃烧计算也应定义墙热边界条件。可使用任何FLUENT中可用的标准条件，包括指定墙温度，热流量，表面传热系数，或表面辐射。如果在域中包括辐射，也应定义墙发射率。见6.13.1节关于墙热边界条件的详细资料。

第四步：定义物理属性 （Define Physical Properties）

当使用非预混燃烧模型时，为所有流体区域使用的材料被自动设置为“pdf-mixture”。该材料为13.1.2节中讨论的混合物燃料概念的一种特殊情形。该混合物的组成组分是在prePDF中定义的组分；不能在FLUENT中改变这些组分。当使用非预混模型时，考虑的每种组分的热容，分子量和生成焓从化学数据库中解压出来，因此将不调整PDF混合物中组成组分的任何属性。对PDF混合物自身，

其密度由查询表确定，比热通过7.5.4节讨论的混合定律使用为从化学数据库中（thermodb.scm）得到的组成组分比热值确定。

因此为每一个非预混燃烧问题的物理属性输入仅是对PDF混合物的输运属性（速度，导热系数等）。在"Materials"面板中设置这些属性，在"Mixture Materials"列表中选择混合物为"Material Type"，"pdf-mixture"（默认，且是唯一的选择），并为输运属性设置渴望的值。

Define→Materials…

见第7章关于设置物理属性的详细资料。如果希望的话，非预混燃烧问题中输运属性可定义为温度的函数，但是不能为成分的函数。实际上，由于紊流效应将占优势，包括平均对温度依存的这些输运属性将没什么益处。

如果正模拟辐射传热，也将输入辐射属性，如7.6节所述。允许随成分而定吸收系数（使用WSGGM）。

第五步：解流动方程 （Solve the Flow Problem）

FLUENT中非预混燃烧模拟进程的下一步为解混合分数方程和流动方程。首先，初始化流动。通过默认，混合分数及其变化变量已有初始值为0，推荐值；通常不应为这些变量设非零初始值。见22.13节关于解的初始化的详细资料。

Solve→Initialize→Initialize…

接着，以通常方式开始计算。

Solver→Iterate…

在计算过程中，FLUENT在残差报告的"fmean"和"fvar"栏中为混合分数及其变化变量报告残差：

```
iter cont     x-vel   y-vel       k epsilon   fmean    fvar
 28 1.57e-3 4.92e-4 4.80e-4 2.68e-2 2.59e-3 9.09e-1 1.17e+0
 29 1.42e-3 4.43e-4 4.23e-4 2.48e-2 2.30e-3 8.89e-1 1.15e+0
 30 1.28e-3 3.98e-4 3.75e-4 2.29e-2 2.04e-3 8.88e-1 1.14e+0
```

（对二混合分函数计算，将出现"psec"和"pvar"栏。）

PDF方程的欠松弛因子 （Under-Relaxation Factors for PDF Equations）

平均混合分数和混合分数变化变量的输运方程相当稳定，当求解它们时可用高度欠松弛。通过默认，平均混合分数（和次要部分分数）的欠松弛因子为1，混合分数变化变量（或次要部分分数变化变量）为0.9。如果这些方程的残差增加，应考虑降低这些欠松弛因子，如22.9节所讨论。

密度欠松弛 （Density Under-Relaxation）

燃烧计算可能收敛困难的主要原因之一是温度大变化引起密度大变化，而密度大变化能引起流动解的不稳定。FLUENT允许欠松弛密度中的变化以减轻困难。密度欠松弛的默认值为1，但是如果遇到麻烦，就会希望将该值减少到0.5和1之间（在"Solution Controls"面板）。

为二混合分数计算调整PDF参数 （Tuning the PDF Parameters for Two-Mixture-Fraction Calculations）

对包含次要流的情形，PDF积分在FLUENT内部进行。在"Species Model"面板中定义这些积分参数（图14.3.25）。

Define→Models→Species…

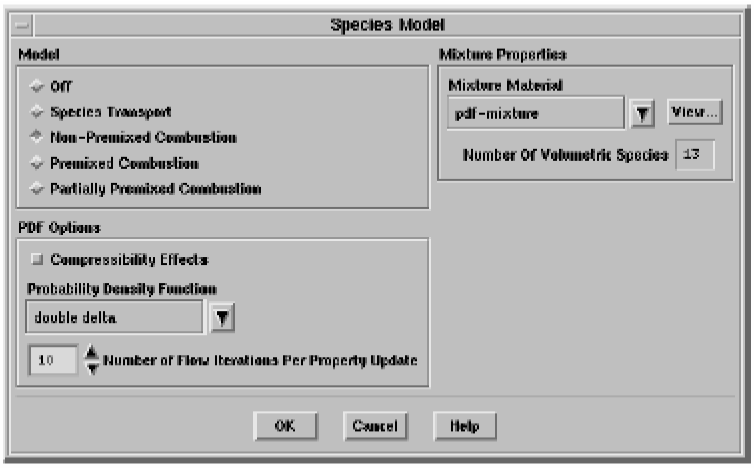


图14.3.25：为二混合分数计算的“Species Model”面板

Figure 14.3.25: The Species Model Panel for a Two-Mixture-Fraction Calculation

参数如下：

Compressibility Effects（可压缩性效应）（仅对非绝热系统）：告诉FLUENT从PDF表中更新密度，温度，组分质量分数和焓来解决系统变压。

Probability Density Function （几率密度函数）：指定使用那种PDF类型。在下拉列表中即可拾“double delta”（默认）又可拾取“beta”。这些选择和在prePDF中对单一混合分数情形所见的一样。（见14.1.2节）。“double delta”PDF比“beta”算得快，并且是默认的。然而，“beta”函数是PDF更精确的表示。

Number of Flow Iterations Per Property Update （每一属性更新的流动迭代数）：指定多久从查询表中对密度，温度和比热更新一次。记住：当正计算二混合分数时，属性更新包括PDF的计算并可完全CPU-强化（CPU-intensive）。一般不应减少“Number of Flow Iterations Per Property Update”在默认值10以下，除非正经历收敛困难。

对模拟包括非绝热多变形小火焰，如果在小火焰文件中存在大量组分，查询四维PDF表可CPU-强化。在这种情形下，“Number of Flow Iterations Per Property Update”控制平均分子量的更新，包括为组分质量分数查询PDF表。

第六步：FLUENT中非预混模型结果的后处理 （Step 6: Postprocessing the Non-Premixed Model Results in FLUENT）

非预混燃烧模拟进程的最后一步为来自混合分数和流场解数据的组分浓度和温度数据的后处理。由其注意下列变量：

- Mean Mixture Fraction (in the Pdf... category)（
- Secondary Mean Mixture Fraction (in the Pdf... category)
- Mixture Fraction Variance(in the Pdf… Category)
- Secondary Mixture Fraction Variance (in the Pdf... category)
- Fvar Prod (in the Pdf... category)
- Fvar2 Prod (in the Pdf... category)
- Mass fraction of (species-n) (in the Species... category)
- Mole fraction of (species-n) (in the Species... category)
- Concentration of (species-n) (in the Species... category)

- Static Temperature (in the Temperature... category)
- Enthalpy (in the Temperature... category)

可选择在后处理面板中出现的变量选择下拉列表的类中指明的这些量进行显示。见第27章对这些量的定义。

在所有情况下，使用查询表由混合分数 / 变化变量场得到组分浓度。注：温度和焓可进行后处理，甚至是当FLUENT模型为非绝热非预混燃烧模拟，而模拟中没解能量方程时。不管是绝热还是非绝热，温度都得自于prePDF中创建的查询表。

图14.3.26和14.3.27阐明了一个使用非预混法对甲烷扩散火焰模拟的典型结果。

14.3.4 使用非预混模型模拟液体燃料燃烧

液体燃料燃烧可用非预混模型模拟。在prePDF中，有液体燃料蒸发产生的燃料蒸汽定义为燃料流，氧化剂（如空气）入口成分定义为氧化剂流。（见14.3.1节）。当使用非预混模型时，在求解域里蒸发的液体燃料作为一个燃料混合分数，*f*，源出现。

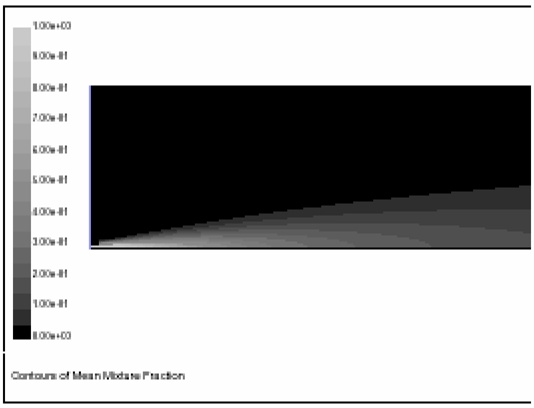


图14.3.26：在一个甲烷扩散火焰中预测的混合分数等值线

Figure 14.3.26: Predicted Contours of Mixture Fraction in a Methane Diffusion Flame

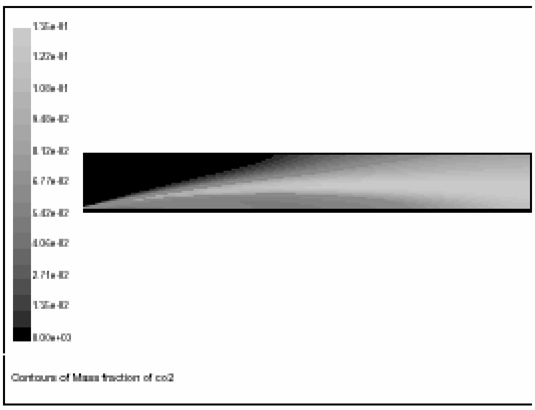


图14.3.27：使用非预混燃烧模型预测的CO_2质量分数等值线

Figure 14.3.27: Predicted Contours of CO2 Mass Fraction Using the Non-Premixed Combustion Model

在FLUENT中，以一般方式定义液体燃料模型。气相（氧化剂）流入口使用零入口混合分数模拟，小燃料滴作为分散相喷射引入（见19.9节）。非预混模型

不改变液体燃料小滴的属性输入，而且应像通常一样输入（见19.11节）。注：当需要为正蒸发的液体输入气相组分目标时，应输入像在prePDF中定义的构成燃料流的组分。

注：如果在prePDF中定义燃料流为一个成分混合物，应简单选择这些成分中的一种作为蒸发组分“evaporating species”。FLUENT将保证从液体小滴中蒸发的质量作为一种在prePDF中定义的燃料混合物的源进入气相中。这里所选择的蒸发组分仅用来计算被主动力控制按蒸发率进行的扩散。

14.3.5 使用非预混模型模拟煤燃烧 （Modeling Coal Combustion Using the Non-Premixed Model）

可使用非预混方法来模拟煤燃烧，既可用单一混合分数（燃料流）又可用二混合分数（燃料流和次要流）。该节描述对使用非预混法的煤燃烧模型的模拟选项和特殊输入顺序。

！ 注：prePDF 为煤燃烧使用了一种不同于prePDF 1的公式。如果有一个用prePDF 1输入文件定义的煤燃烧系统，可将该输入文件读入prePDF 4但是将不得不在计算新的prePDF 4 PDF查询表以前修正煤燃烧的定义。在 4中使用prePDF 1的输入文件，但没有对煤燃烧的定义作需要的修正，将导致产生错误的PDF查询表。对燃料成分在prePDF 4中正确的定义顺序将在本节描述。

由prePDF 2或prePDF 3创建的PDF文件将对煤成分的正确输入，因此，不需要改变这些输入。但是，你可能会想考虑用prePDF 4重新计算查询表，如14.3.3节所述。如果有来自prePDF 2或3的二混合分数PDF文件，将需要将其读入prePDF 4，并写为FLUENT 6格式的文件。

煤燃烧非预混模拟选项 （Non-Premixed Modeling Options for Coal Combustion）

对煤燃烧有三个基本非预混模拟选项：

- 当煤为系统中唯一的燃料时，可用二混合分数模拟煤。当使用该法时，一个流用来代表焦炭，另一个用来代表挥发分。一般上，焦炭流成分用100％C(s)来代表。挥发分流成分通过选择合适的组分并设置他们的摩尔或质量分数来定义。交替的，为定义这些成分，可使用经验法（原子分数输入）。

！ 由于二混合分数法将挥发分流和焦炭流分开模拟，因此使用二混合分数模拟煤燃烧比使用一个混合分数更精确。然而，在运行中由于执行多维PDF积分，二混合分数模型若起额外的的计算代价。

- 当系统中煤是唯一的燃料时，可选择使用单一混合分数（燃料流）来模拟煤。当采用该法时，定义的煤成分既包括挥发分又包括焦炭。可通过选择合适的组分并设置其摩尔分数或通过使用经验法（原子分数输入）来定义燃料流成分。成分定义的细介绍见下面。

！ 对煤燃烧使用单一混合分数比使用二混合分数精度低。然而，在FLUENT中的收敛基本上比二混合分数模型要快。

- 当煤与其他燃料（气体或液体）一起使用时，必须用一个混合分数模拟煤，并使用第二个混合分数代表第二种燃料（气体或液体）。与煤成分联在一起的流定义为上面为单一混合分数模型的细节。

在prePDF中定义煤成分：单一混合分数模型（Defining the Coal Composition in prePDF:

Single-Mixture-Fraction Models）

当用单一混合分数（燃料流）模拟煤时，燃料流成分可用下列两种方法之一输入：

- 传统方法：在燃料流中定义煤内的组分混合物及组分摩尔或质量分数：

1、使用“Define Species”面板选择存在于煤燃烧系统中的组分列表（如，C_3H_8，CH_4，CO，CO_2，$H_2O(l)$，H_2O，H_2，OH，O，C(s)，O_2，和N_2）。

2、使用“Composition”面板，选择燃料流并定义煤燃料中存在的每种组分的摩尔或质量分数。注：C(s)用来代表煤中的焦炭成分。例如，考虑一种煤，摩尔成分为40％的挥发分，60％的焦炭，在干灰游离（dry ash free）基础上。假设挥发分能由C_3H_8和CO组成的克分子数相等的混合物代表，“Composition”面板中燃料流成分将为C_3H_8＝0.2，CO=0.2，C(s)=0.6。注：即使在FLUENT计算中将考虑灰，在prePDF中煤成分应也总是按ash free basis定义。下面的表解释了从一个典型基于质量的近似分析转化到prePDF需要的组分分数输入。注：该转化需要做一个关于组分代表挥发分的假设。这里，挥发分被假定为作为一个由丙烷和一氧化碳组成的克分子数相当的混合物存在。

近似分析	重量％	kg（DAF）	Moles（DAF）	摩尔分数（DAF）
挥发分	30			
C_3H_8		0.1833	0.0417	0.0715
CO		0.1167	0.0417	0.0715
固定碳（C(s)）	60	0.6	0.6	0.8570
灰	10	-	-	-
总量			0.5834	1.0

可通过将湿气作为液态水，$H_2O(l)$，添加到燃料成分中来考虑煤湿气。湿气也可定义为水蒸汽，H_2O，在FLUENT中的离散相材料输入里提供相应的潜伏热。

- 经验燃料法：为燃料流使用“Empirically Defined Streams”选项。如果有对煤的元素分析，该方法将很理想。

1、使用“Define Species”面板选择煤燃烧系统中存在的组分列表（如，C_3H_8, CH_4, CO, CO_2, $H_2O(l)$, H_2O, H_2, OH, C(s), O_2，和N_2）。另外，必须选择原子C,H,N,S和O。

2、在“Composition”面板中，选择燃料流并定义燃料流中的C,H,N,S和O的摩尔原子分数。另外，将输入煤的低热值和平均比热。PrePDF将使用这些输入来确定系统中已经包括的化学组分的摩尔分数。

注：在所有这些组分输入法中，应注意区分原子碳，C，和固体碳，C(s)。如果正使用经验燃料输入法，仅应选择原子碳。

在prePDF中定义煤成分：二混合分数法 （Defining the Coal Composition in prePDF:

Two-Mixture-Fraction Models）

如果将既使用燃料流又使用次要流的FLUENT模型表示煤，那么一个流用来表示焦炭，另一个用来表示挥发分。（典型地，燃料流用来表示焦炭，次要流用来表示挥发分，但是反过来也可以。在下面的顺序中，假设燃料流表示焦炭，次要流表示挥发分。）

可使用下列方法之一输入燃料流额次要流成分：

- 传统方法：定义煤中组分的混合物并定义燃料流和其在燃料流和次要流中的摩尔或质量分数：

1、使用“Define Species”面板选择存在于煤燃烧系统中的组分列表（如，C_3H_8, CH_4, CO, CO_2, $H_2O(l)$, H_2O, H_2, OH, H，O，C(s), O_2，和N_2）。

2、使用“Composition”面板，选择燃料流并定义用来表示焦炭的组分的摩尔或质量分数。一般上，将为燃料流输入100％C(s)。

3、使用“Composition”面板，选择次要流并定义用来表示挥发分的组分的摩尔或质量分数。

- 经验燃料法：为挥发分（这种情形下，次要）流使用“Empirically Defined Streams”选项。如果有煤的元素分析，该法将很理想。

1、使用“Define Species”面板选择存在于煤燃烧系统中的组分列表（如，C_3H_8, CH_4, CO, CO_2, $H_2O(l)$, H_2O, H_2, OH, C(s), O_2，和N_2）。另外，必须选择原子C,H,N,S和O。

2、使用“Composition”面板，选择燃料流并定义用来表示焦炭的组分的摩尔或质量分数。一般上，将为燃料流输入100％C(s)。该顺序假定没正在为燃料流（焦炭）使用经验输入。

3、使用“Composition”面板，选择次要流并挥发分中C,H,N,S和O的原子分数。另外，将输入煤的低热值和平均比热。prePDF 将使用这些输入来确定系统中已包括的化学组分的摩尔分数。例如，按下面DAF（dry ash free）数据和元素分析来考虑煤：

近似分析	Wt％（dry）	Wt％（DAF）
挥发分	28	30.4
焦炭（C(s)）	64	69.6
灰	8	-

元素	Wt%（DAF）	Wt%（DAF）
C	89.3	89.3
H	5.0	5.0
O	3.4	3.4
N	1.5	2.3
S	0.8	-

（注：最后一栏，为简化模拟，煤中硫这一栏合并到氮的质量分数中。）

可将近似和最终分析数据合并产生下面的挥发分流的元素成分：

元素	质量	Wt%	摩尔	摩尔分数
C	（89.3～69.6）	0.65	5.4	0.24
H	5.0	0.16	16	0.70
O	3.4	0.11	0.7	0.03

N	2.3	0.08	0.6	0.03
总量	30.4		22.7	

该调整后的成分用来定义次要流（挥发分）成分。

挥发分的低热值可由已知的煤和焦炭（DAF）的加热值来计算：

$-LCV_{coal,DAF}$＝35.3MJ/kg

$-LCV_{char,DAF}$＝32.9MJ/kg

可计算挥发分的加热值为

$$LCV_{vol} = \frac{35.3\text{MJ/kg} - 0.696 \times 32.9\text{MJ/kg}}{0.304}$$

或

LCV_{vol}＝40.759MJ/kg

注：在所有这些组分输入法中，应注意区分原子碳，C，和固体碳，C(s)。如果正使用经验燃料输入法，仅应选择原子碳。

FLUENT中煤燃烧模拟输入 （Coal Modeling Inputs in FLUENT）

在 FLUENT 里，当选择非预混燃烧模型时，像通常一样对煤燃烧模拟进行定义。空气（氧化剂）入口定义为有零混合分数值。不包括气相燃料入口，唯一的燃料源来自于煤的液化作用和焦炭燃烧。用通常方式使用“Set Injection Properties”面板将煤颗粒定义为喷射，煤材料的物理属性如 19.11 节所述指定。当为煤材料定义喷射和离散相材料属性时应紧记下面的问题：

- 在“Set Injection Properties”面板中，将为氧化剂流组成之一指定“Oxidizing Species”，像在 prePDF 中定义的一样。该组分浓度场将被用来用焦炭燃尽定律（如果可接受）计算扩散控制主动力。
  焦炭流和挥发分流的特性依赖于正在定义的模型类型而会不同：
  －如果使用单一混合分数模拟煤，代表挥发分的气相组分和焦炭燃烧用非预混模型使用的混合分数来表示。
  －如果使用二混合分数模拟煤，将为挥发分和焦炭指定“Devolatilizing Stream”和“Char Stream”，而不是指定一个目标组分。
- 在“Materials”面板中，“Vaporization Temperature”应设置为与 prePDF 中的燃料入口温度相等。该温度控制着液化作用进程的开始。相反的规定，在 prePDF 中定义的燃料入口温度应被设置为想要开始液化作用处的温度。按这种方式，prePDF 产生的查询表中将为进程包括合适的温度范围。
- 在“Materials”面板中，“Volatile Component Fraction”和“Combustible Fraction”应设置为与在prePDF中用来定义燃料流（和次要流）煤组成一致的值。
- 也在“Materials”面板中，将被提示“Burnout Stoichiometric Ratio”（燃尽化学当量比）和“Latent Heat”（潜伏热）。当使用非预混燃烧模 型时，“Burnout Stoichiometric Ratio”用在扩散控制燃尽率中但对系统化学反应没有其他的影响。“Burnout Stoichiometric Ratio”是每单位质量的焦炭所需的氧化剂质量。默认值为1.33，其假设C(s)被O_2氧化生成CO。“Latent Heat”输入决定了产生在非预混系统化学反应中定义的蒸汽相挥发分所需的热量。当使用非预混模型时，通

常可将该值设为0，因为已基于煤的全加热值定义挥发分组分。然而，如果prePDF中定义的煤成分包括水，潜伏热应设为以下：

－如果煤的水份已被定义为$H_2O(l)$，则将潜伏热设为0。

－如果煤的水份已被定义为水蒸汽，H_2O，通过挥发分中水填充的质量调整，将潜伏热设为水的值（2.25×10^6 J/kg）。在该情形中，定义的水份将会与煤中其他组分一起发展，但是prePDF系统化学不包括潜伏热效应。

- 在“Materials”面板中为煤定义的“Density”应为显密度，包括灰分。这应与prePDF中C(s)密度输入相区别，在prePDF中，应使用dry ash free char 密度。
- 将不被询问对焦炭燃烧为“Burnout” 定义“Heat of Reaction”。该量根据prePDF的输入计算。

煤燃烧非预混模型的后处理 （Postprocessing Non-Premixed Models of Coal Combustion）

FLUENT 使用“DPM Evaporation / Devolatilization”后处理变量报告来自煤的挥发分释放率。用“DPM Burnout”变量报告焦炭燃尽率。

14.4 层流火焰模型

层流火焰模型通过把离散，定常层流火焰叫做小火焰，.并用之近似模拟紊流火焰。我们假定作为个体的小火焰和简单结构的层流火焰拥有相似的结构，而小火焰是由计算或实验的得到的。在 prePDF 中使用具体的化学机理，prePDF 就可以在非预混燃烧中计算逆向层流扩散小火焰。并通过使用静态 pdf 法将层流小火焰包含于紊流火焰中。

层流小火焰近似法的优点在于能够将实际的动力效应融合在紊流火焰之中。如在 14.3 中提到的平衡方法，就可以预处理化学性质，这将节省大量的计算时间。然而，层流小火焰法局限用于相对高速的化学反应中。我们认为，在瞬间内，小火焰就能够对空气动力学应变有所反映。因此，这种模型就不能够充分表现如点火，熄火和如 Nox 这一类反应速度缓慢的化学反应。

关于混合分数模型的知识请查看第 14.1 节。

- 14.4.1 简介
- 14.4.2 约定与假设
- 14.4.3 小火焰概念
- 14.4.4 生成
- 14.4.5 读入
- 14.4.6 层留下火焰模型中的用户输入

14.4.1 简介。

在扩散火焰中，燃料和氧化剂扩散至反应区，遇到活性中心，点火发生。更多的热和活化中心由此产生，一些扩散出去。在近似平衡火焰中，火化中心和温度浓度增加，火化中心和热就更多地从火焰中挥发出去。留给火化中心达到平衡的时间就越短，当地不平衡性增加。

层流小火焰模型适合预测中等强度非平衡化学反应的紊流火焰，而不平衡性是

由于紊流所产生的空气动力学应变引起的。然而，化学反应能够迅速的对例如应变松弛和对平衡能力的化学松弛等应变作出迅速的反应。

当化学反应时间尺度和流体运输时间尺度相当时，火化中心被认为是达到全局化学不平衡，这些反应包括 Nox 的形成和低温 CO 的氧化。层流小火焰模型不适合于反应速度缓慢的燃烧火焰。相反的，应当使用轨道颗粒假设(如 Nox 模型)，或是用 EDC 模型（相见 13.1.1）。

14.4.2 假设与限制条件

在 fluent 中所有运用小火焰模型都必须遵循以下的假设：

a,在模型中只能单混合分数，双混合分数模型是不允许的。

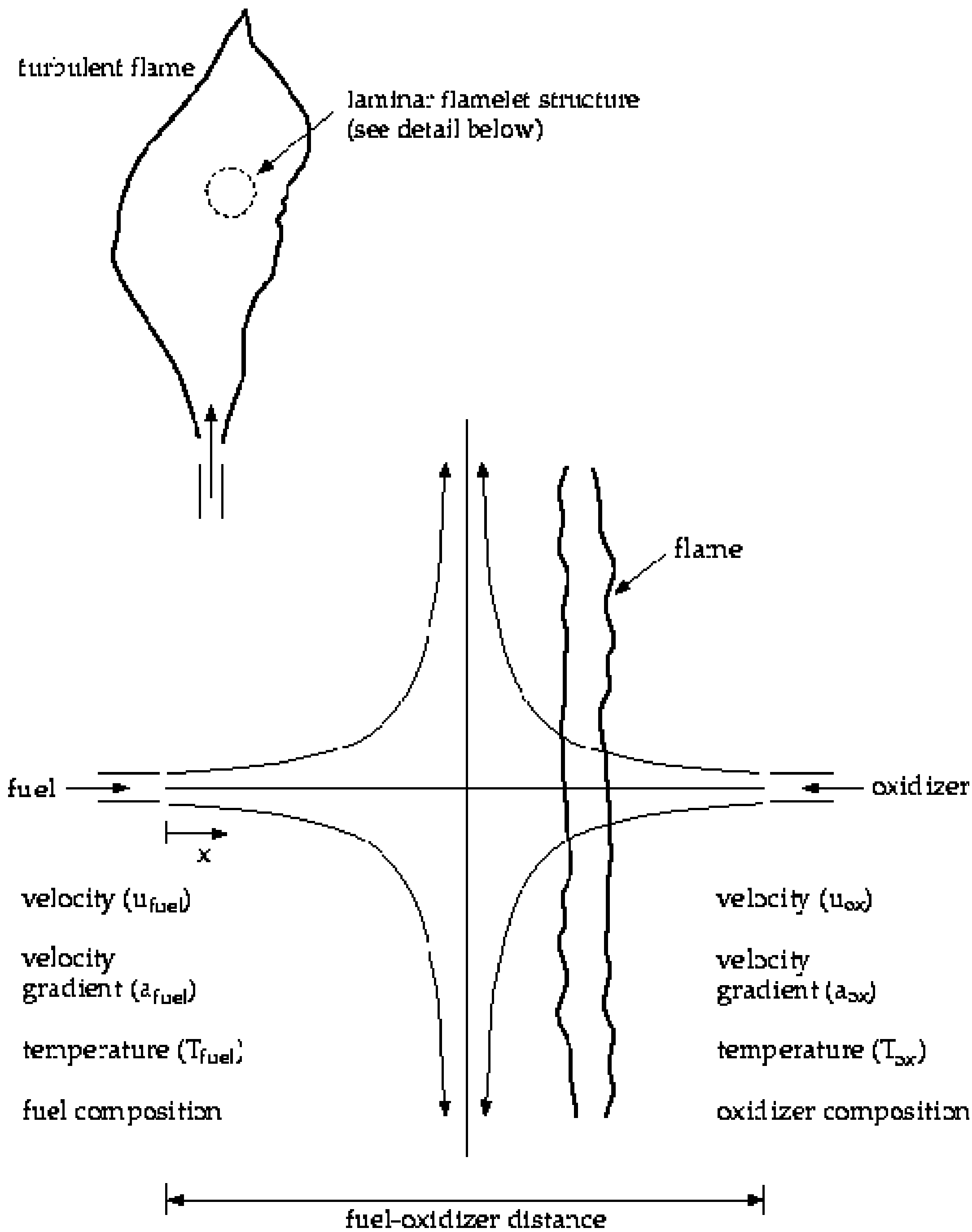
b. 假定混合分数遵守 β -函数 pdf，标量耗散遵循双 δ 方程 pdf。

c. 以经验为基础的气流不能用小火焰模型。

14.4.3 小火焰的概念

概述

小火焰模型认为紊流是由紊流流动区域内的很薄的局部的一维的层流小火焰构成【27，176，177】（见图 14.4.1）。



用来逆向扩散火焰来表示紊流小火焰中的层流火焰。这幅图表示的是流向相对的轴对称的燃料喷嘴和氧化剂射嘴的示意图。当喷嘴的距离减少或射流速度增加时，火焰就会变形，并偏离化学平衡直至最终消失。我们可以从逆向层流扩散火焰试验中得到质量分数和温度区域，一般是计算得出。对于后者，由于存在自相似，控制方程能够简化为一维形式，这样，可以实现完全化学反应的计算了。

在逆向层流火焰中，混合分数 f（详见 14.1.2）从燃油喷嘴开始到氧化剂喷嘴处开始单调的递减至 0。假如质量分数和温度反映混合分数与实际空间相关，他们就能够用唯一的混合分数和应变率(等效地标量耗散 χ,详见 14.4-2)这两个变量来描述。从而，就可以用两个参数 f 和 χ 来完全表述化学反应。

这种把化学反应用 f 和 χ 这两个参数完全描述的方法使小火焰计算能够进行预处理，并被储存在表中。过对化学反应的预处理，可以大大减少计算时间。

平衡方程，解决方法，逆向层流扩散火焰的计算实例可以在一些参考文献中找到。具体的解释与分析可以在【27，51】中找到。

应变率及梯度耗散

对于逆流扩散小火焰，典型的应变率可以如下定义： $a_s = v/2d$，v 是燃料和氧化剂的速度，d 是喷嘴口之间的距离。

替代了使用应变率来量化非平衡偏离的方法以后，使用 χ.来表示的标量耗散就很方便。标量耗散定义如下：

$$\chi = 2D|\nabla f|^2 \tag{14.4.1}$$

这里的 D 代表相对应的扩散系数。

我们应当注意的是标量耗散项 χ 随着小火焰的轴向变化。对于逆流结构而言，在【176】中提到，小火焰的应变率 a_s 与 f 相关。

$$\chi_{st} = \frac{a_s \exp\left(-2[\mathrm{erfc}^{-1}(2f_{st})]^2\right)}{\pi} \tag{14.4.2}$$

χ_{st} = 标量耗散，在 $f = f_{st}$ 处

a_s = 特征应变率

f_{st} =化学当量混合分数

erfc^{-1} = 反 erf 函数

在物理上而言，当火焰变形时，反应区的宽度减小，在化学恰当比的位置（$f = f_{st}$）处 f 的梯度增加。那就用瞬间的标量耗散 χ_{st} 作最主要的非平衡参数。其量纲是 s^{-1}，可以认为其是特征耗散时间的倒数。在 $\chi_{st} \to 0$ 的极限时，化学反应趋于平衡，随着 χ_{st} 的增加，非平衡性增加。当 χ_{st} 超过极值点时发生小火焰的局部淬息现象。

嵌入到紊流火焰中的层状小火焰 s。

紊流火焰刷（turbulent flame brush）以离散的层状小火焰维模型。因此，对于绝热系统，在小火焰模型中物质分数和温度完全是 f 和 χ_{st} 的函数，在紊流火焰中的温度和物质分数可以如下确定：

$$\overline{\phi} = \int\int \phi(f, \chi_{st}) p(f, \chi_{st})\, df\, d\chi_{st} \tag{14.4.3}$$

ϕ是典型标量如物质分数，温度，密度等。在 prePDF 中，假定 f 和χ_{st}在统计学上是相互独立，因此相关的$p(f,\chi_{st})$表达式就可以简化为$p_f(f)p_\chi(\chi_{st})$。认为β PDF 形式是 p $_f$，而在 fluent 中用关于$\overline{f}$和$\overline{f'^2}$的运输方程来确定 p $_f$。双 δ pdf 中，和β PDF 一样，假定p_χ由其前面两个力矩（monent）确定。第一力矩即平均标量耗散$\overline{\chi_{st}}$在 fluent 中的定义如下：

$$\overline{\chi_{st}} = \frac{C_\chi \epsilon \overline{f'^2}}{k} \qquad (14.4.4)$$

假定C_χ是值为 2 的常数。在 prePDF 中，定义标量耗散方差为常数。根据参考文献【27】，在实际运用中我们可以忽略标量耗散的脉动。但值得注意，沿着标量耗散坐标方向，若使用非零的标量耗散系数可以的到更加平滑的曲线。为了在 fluent 中避免 PDF 卷积，在 prePDF 中对公式 14.4.3 整合进行预处理，并存处在列表中。对于绝热流，单小火焰表中有两个量纲：$\overline{f}$和$\overline{f'^2}$，复合小火焰表中则多了一个$\overline{\chi_{st}}$。

对于非绝热流体，我们还需要有焓的函数。然而，在焓值较大的范围内进行小火焰的计算，其计算费用很高。所以我们就必须做一些近似。我们假定系统的热损/得热对质量分数的影响可以忽略不计，在【20，164】中使用了预先指定焓值处的小火焰质量分数。在一定范围热焓得失($\overline{H^*}$)的范围内，由式 14.1-14 得出温度。相应的，平均温度和密度的 PDF 表与平均焓值相关。

在 prePDF 中，你可以自己定义，也可以从其他已存在的文件中导入。包括 OPPDIF [147]，RIF [8, 9, 181] 和 RUN-1DL [179]. 在 PrePDF 中可以导入 OPPDIF 格式的小火焰文件和其它标准格式的小火焰文件。

生成和导入小火焰的方法详见 14.4.4 和 14.4.5。

14.4.4 小火焰的生成。

可以把逆向层流扩散火焰方程空间格式转化为以混合分数（f）为变量的形式[182]。在 prePDF 中，解一系列被简化后的 f 函数方程【181】。在这里，由 N 方程解质量分数 Y $_i$，

$$\rho\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2}\rho\chi\frac{1}{\mathrm{Le}_i}\frac{\partial^2 Y_i}{\partial f^2} + S_i$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\partial Y_i}{\partial f}\left[\rho\chi\frac{1}{\mathrm{Le}_i^2}\frac{\partial \mathrm{Le}_i}{\partial f}\right]$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\partial Y_i}{\partial f}\left[\frac{1}{2}\left(1-\frac{1}{\mathrm{Le}_i}\right)\left(\frac{\partial\rho\chi}{\partial f}+\rho\chi\frac{c_p}{k}\frac{\partial(k/c_p)}{\partial f}\right)\right] \quad (14.4.5)$$

由公式计算温度

$$\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{2}\rho\chi\frac{\partial^2 T}{\partial f^2}-\frac{1}{c_p}\sum_i H_i^* S_i$$

$$+\frac{1}{2c_p}\rho\chi\left[\frac{\partial c_p}{\partial f}+\sum_i\frac{1}{\mathrm{Le}_i}c_{p,i}\frac{\partial Y_i}{\partial f}\right]\frac{\partial T}{\partial f}$$

$$-\frac{1}{c_p}\left[4\sigma p\sum_i X_i a_i(T^4-T_b^4)\right] \quad (14.4.6)$$

在方程 14.4-5 和 14.4-6 中的变量为 Y_i，T，ρ， f 式第 I 个质量分数，温度，密度和混合分数。Le_i是第 I 个 Lewis 数，具体定义在 13.1-4 中。k，$c_{p,i}$，和 c_p 相应的是热导率，第 I 种的比热和混和平均比热。Si 是第 I 种物质的反应速率。H^*_I 是第 I 种物质的比焓。耗散标量 χ 必须在小火焰中定义。公式 14.4-2 的变形形式在【114】中使用。

$$\chi(f)=\frac{a_s}{4\pi}\frac{3(\sqrt{\rho_\infty/\rho}+1)^2}{2\sqrt{\rho_\infty/\rho}+1}\exp\left(-2[\mathrm{erfc}^{-1}(2f)]^2\right) \quad (14.4.7)$$

方程 14.4-6 中的最后一项是为了考虑小火焰中的辐射耗散项。σ 是 Stefan-Boltzmann 常数，p 是压力，Xi 是第 I 种物质的摩尔分数，a_I 是 Planck 平均吸收系数(见【83】)的多项式系数。Tb 是背景（无穷远处）温度。使用辐射项可以稍为提高准确性，但在低应变率下会导致发散。因此，使用这一项应该小心谨慎。

cai

!! 尽管在 prePDF 中可以考虑微分扩散作用，但 fluent 中的缺省值为 $\mathrm{Le}_i=1$。当激活 Lewis 数后，Lewis 数自动按照时 13.1-4 计算。由于混合分数的计算形式有很多简化，因此按缺省定义 $\mathrm{Le}_i=1$ 可以得到较满意的结果。我们推荐使用缺省值，尤其时如 H_2 这一类非常容易扩散的物质。

你可以调整离散混合分数间隔的网格点。因为物质分数和温度是用耦合，隐式的方法解的，随着 f 网格点的数量的增加，计算的时间和所需要的内存的量大大增加。推荐使用中等大小的值。

在 prePDF 中提供参数用以控制解方程 14.4-5 和 14.4-6 的稳定性。当计算发散时，可以调节两个增长因子。

非绝热层流 prePDF

对于非绝热小火焰，prePDF 遵循【20，464】中的近似并假设小火焰的剖面线不受小火焰中的热损/得热的影响。这样处理是恰当的并始终如此处理。进一步讲，不需要生成特殊的非绝热小火焰剖面，这避免了令人讨厌的预处理步骤。此外，prePDF 和 FLUENT 与其他的外部小火焰格式（OPPDIF, RIF,

RUN-1DL）的兼容性保持不变。这样做的缺点时没有考虑到物质分数的热损失的作用。此外，没有考虑熄火极限的影响。

在平衡非预混燃烧模型中，温度的极限为 $T_{\rm min}$ 和 $T_{\rm max}$ 。对非绝热小火焰模型，这种极限时范围或混合分数和标量耗散的公式限制了使用的焓范围。

下限 $T_{\rm min}(f,\chi)$ 是在点（f, χ ）和 $T_{\rm ad}(f)-\Delta T^-$ 的小火焰解的温度的最小值，此下限不能低于在计算小火焰中所用的当地随地温度 $T_{\rm MIN}$:

$$T_{\rm min}(f,\chi)=\max(T_{\rm MIN},\min[(T_{\rm ad}(f)-\Delta T^-),T_{\rm fl}(f,\chi)]) \quad (14.4.8)$$

温度上限曲线 $T_{\rm max}(f,\chi)$ 由用户所定义的最高环境温度的最大值（ $T_{\rm MAX}$ ）的极值计算得到。既是小火焰计算式在点 f 和 $T_{\rm ad}(f)+\Delta T^+$ 点的值:

$$T_{\rm max}(f,\chi)=\max(T_{\rm MAX},T_{\rm ad}(f)+\Delta T^+,T_{\rm fl}(f,\chi)) \quad (14.4.9)$$

这里

f	=	混合分数
χ	=	耗散标量
$T_{\rm MIN}$	=	当地最低温度
$T_{\rm MAX}$	=	最大值（例如，热壁或进口）
ΔT^-	=	由于若素所引起的最大温降
ΔT^-	=	超过绝热温度曲线的最大温升
$T_{\rm fl}$	=	小火焰轮廓线的温度
$T_{\rm ad}(f)$	=	绝热（平衡）火焰温度

当 flamlet 生成以后，小火焰剖面是很难解的，在 fluent 中被制成表格可以查询。你可以在查询表中确定。假定焓损焓升和标量耗散不变。在 PDF 中有如下选项：

$$T_{\rm mean}(f_{\rm mean},f_{\rm var},H^*,\chi)$$

$Y_{i,\mathrm{mean}}(f_{\mathrm{mean}}, f_{\mathrm{var}}, H^*)$ for $\chi = 0$ (i.e., equilibrium solution)

$Y_{i,\mathrm{mean}}(f_{\mathrm{mean}}, f_{\mathrm{var}}, \chi)$ for $\chi \neq 0$

$\rho_{\mathrm{mean}}(f_{\mathrm{mean}}, f_{\mathrm{var}}, H^*, \chi)$

当 fluent 计算过程中，解了平均混合分数，混合分数方差和平均焓的方程标量耗散域从紊流域和混合分数方差中计算得出，单位温度，密度和物质分数的平均值可由 PDF 选项单中的得到。

14.4.5 小火焰的导入

在 fluent 中可以导入一个或多个小火焰文件，以默认 PDF 形式来恢复这些小火焰（见公式 14.4-3)。从而在 fluent 中建立查询表供使用。你可以在 prePDF 中定义，或使用其他程序生成小火焰文件

我们可以读入两种格式小火焰文件到 prePDF 中去：由 OPPDIF 生成的二进制文件[147]和在 14.4.6 节和 Peters 和 Rogg 的【179】 中所提到的标准形式

小火焰在如 OPPDIF 中的物理空间中生成后，物质量和温度是在空间方向上变化。但是物质量和温度必须从物理空间转换到质量分数所描述的空间中去。如果所有的物质的扩散细数相等，则存在唯一的混合分数。然而，对于不同的扩散系数，混和系数可以用一系列的变量来表示。

对于层流小火焰，prePDF 提供了四种方法计算混合分数。

.C 和 H 的平均值:参考 Drake 和 B lint 的观点[54],混和分数可以由 f_{C} 和 f_{H} 的平均值得出，这里的 f_{C} 和 f_{H} 是指碳和氢的质量分数。

.碳氢混合物模式：根据 Bilger et al. [19],可以按一下公式计算混合分数：

$$f = \frac{b - b_{\mathrm{ox}}}{b_{\mathrm{fuel}} - b_{\mathrm{ox}}} \tag{14.4.10}$$

其中：

$$b = 2\frac{Y_{\mathrm{C}}}{M_{w,\mathrm{C}}} + 0.5\frac{Y_{\mathrm{H}}}{M_{w,\mathrm{H}}} - \frac{Y_{\mathrm{O}}}{M_{w,\mathrm{O}}} \tag{14.4.11}$$

Y_{C}, Y_{H}, Y_{O} 是碳，氢，氧的质量分数，$M_{w,\mathrm{C}}$, $M_{w,\mathrm{H}}$, 和 $M_{w,\mathrm{O}}$ 分子量。b_{ox} 和 b_{fuel} 氧和碳的进口 b 值。

- 氮计量法:按下面的式子，通过氮的物质分数来计算混合分数:

$$f = \frac{Y_N - Y_{N,ox}}{Y_{N,fuel} - Y_{N,ox}} \qquad (14.4.12)$$

Y_N 是沿小火焰变化的氮元素的物质分数, $Y_{N,ox}$ 是在氧化剂进口处氮的物质分数, $Y_{N,fuel}$ 是在燃料进口处的氮的物质分数.

- 从标准格式文件中输入: 这种形式是对在混合分数所表示的空间内的小火焰而言的.如果你使用这种方法, prePDF 将自动寻找混合分数的关键词: Z(这在 [179] 有详细的说明),并取得数据. 如果 prePDF 没有在小火焰文件中找到混合分数的数据,就将使用如下所描述的碳氢化合物公式法。

复合小火焰数据以固定的比率变化;物质和边界条件必定是相同的。复合小火焰的格式如下:

- OPPDIF 格式:在 OPPDIF 说明中必须使用关键词来标注生成复合小火焰的 OPPDIF 格式.

另外,你可以通过使用 prePDF 来将多个单小火焰 OPPDIF 文件合并成复合小火焰 OPPDIF。

- 标准格式:如果你有一系列的标准小火焰模型文件,你就应当手工将其合并成为复合小火焰模型文件 (使用文本编辑器或 UNIX cat **命令来合并生成文件**)。当你将合并得到的文件导入 prePDF 时, prePDF 会寻找关键词 HEADER **并计算其数量以决定小火焰的总数量**.

对于其他类型的文件, prePDF 小火焰轮廓线的数量并按升序排列.在物理空间中生成的小火焰模型,你可以选择四种方法中的一个来计算混合分数. 根据应变率,使用公式 14.4-2 来计算标量耗散.

14.4.6 层流小火焰模型的输入项

先面介绍如何对得到的或导入的小火焰模型使用prePDF的方法得到PDF列表,并介绍相关的文件及格式。

用生成的层流小火焰模型得到 PDF 列表

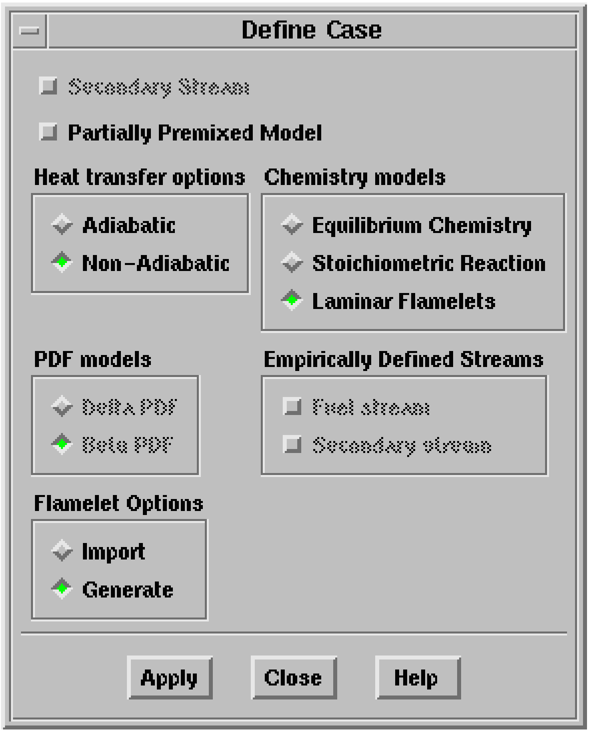
在 14.4.4 中写到的小火焰计算的方法的具体过程在本节有所描述。可以参见 14.3.1 得到开始 prePDF 的方法。

Step1:激活层流小火焰产生项

为了激活层流小火焰产生项,应首先激活 Define Case 面板(图 14.4.2)。

Setup →Case...

Figure 14.4.2: The Define Case Panel



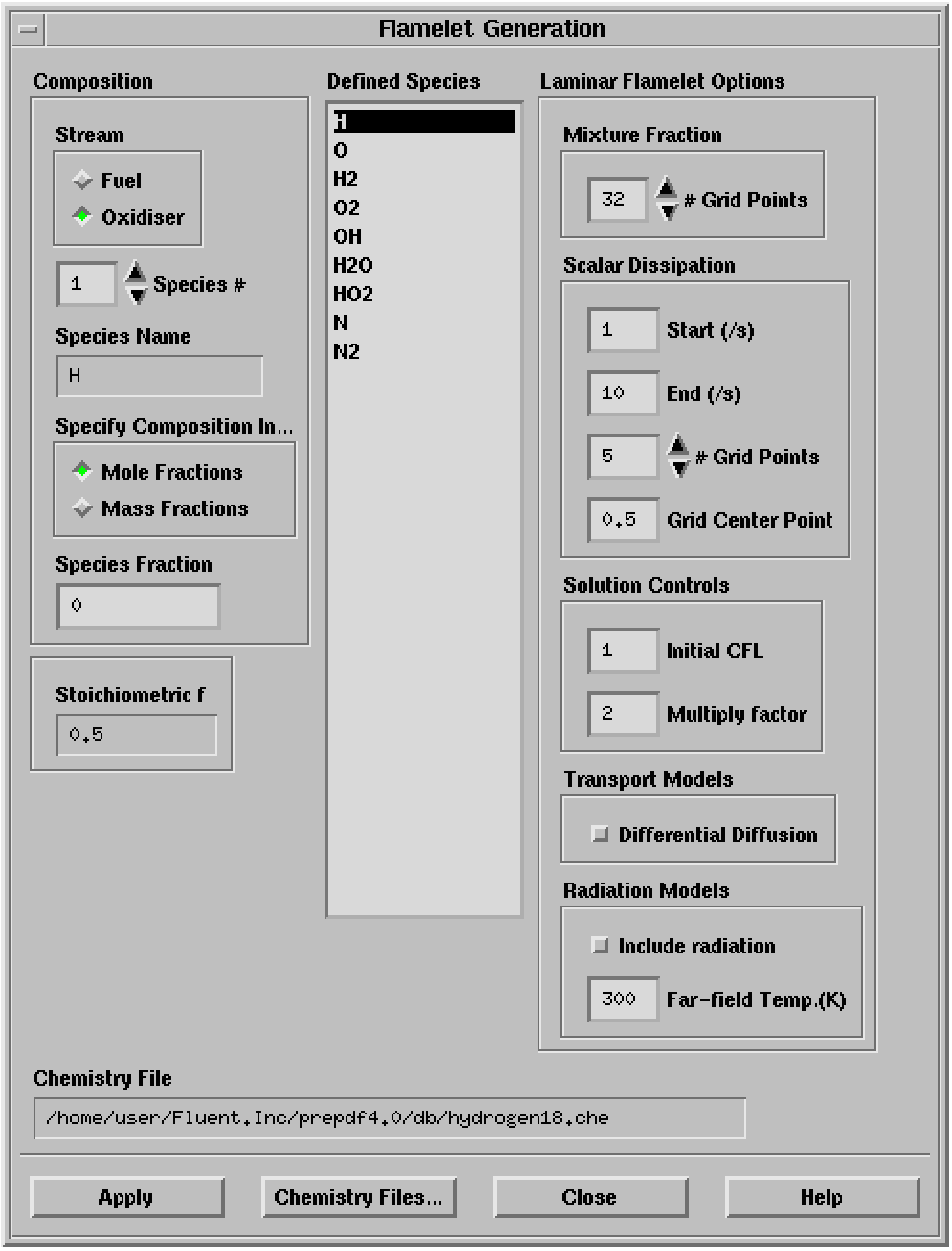
在 Define Case 面板中在 Chemistry models 下选择 Laminar Flamelets 项.在传热项（Heat transfer options）中选择 Adiabatic 或 Non-Adiabatic 项.最后，在 Flamelet options 中选择 Generate

Step 2: 定义小火焰

一旦你激活了 Flamelet Generation 面板,你就可以使用这个面板来定义小火焰.

Setup →Flamelet Generation...

Figure 14.4.3: The Flamelet Generation Panel



Step 2a: 输入化学系数

定义小火焰的第一步是输入物质和化学系统的各个定义。物质的热力学性质，传输和反应数据必须以 CHEMKIN[112]格式输入 . 关于这些文件格式的信息在后面有详细介绍。

要将化学性质文件输入到 prePDF 中去，在 Flamelet Generation 面板中单击 Chemistry Files... 按钮。当你单击按钮以后，就会打开一个选择对话窗,你可以选定你要读入的文件。小火焰计算中的物质种类上限为 100.如果计算的物质的种类超过 n (n

是在 Memory Allocation 面板（详见 14.3.1））中所定义的物质种类的最大数，prePDF 会在 PDF 文件中所有物质当中自动选择选择浓度最大的 n 中物质。

读入化学项文件以后，所包含的物质将可以 Flamelet Generation 面板中的 Defined Species 列表中得到(如图 14.4.3).

Step 2b: 定义燃料和氧化剂组成

要定义燃料和氧化剂组成，你必须在 Flamelet Generation 面板下 Composition 中确定以下参数:

1. 在 Stream 选择 Fuel.
2. 在 Defined Species 列表中选择一种物质。在 Species Composition In... 选择 Mole Fractions 或 Mass Fractions 当中的一个并在 Species Fraction 中输入你想确定的值。
3. 当你对你所输入的的感到满意后,重复上面的操作，对各个燃料项进行确定。
4. 在 Stream 下选择 Oxidiser，重复步骤 1-3 定义氧化剂的摩尔或物质分数。

你可以在 Defined Species 列表中选择和确定当前的物质，并能够检查其所处的状态

Step 2c: 选择小火焰模型的参数

在 Flamelet Generation 面板中，Laminar Flamelet Options 输入以下参数的值。

在 Mixture Fraction 中设定以下参数:

Grid Points
确定在 f=0 和 f=1 之间的网格结点的个数.虽然正比例增加的个数可以提高精度，但由于小火焰模型中的物质量和温度是用耦合和隐式的方法得到的，计算时间及内存的消耗见先行增加. 默认的值（32）对大多数情况而言已经足够了。

在 Scalar Dissipation 中，设定以下参数:

Start (14.4-2 中的 χ_{st}) 所有标量耗散当中的第一个值。当只有一个小火焰时，就会选择自身的第一个耗散标量。 值得注意的是 prePDF 会根据 $\chi_{st}=0$ 自动产生平衡小火焰,因此 Start 标量耗散值应当接近 0;通常设为 1s $^{-1}$

End ：如果有多于一个的小火焰（如在 Scalar Dissipation 的 Grid Points 大于 1 的情况下），end 是最后的一个小火焰的标量耗散值。相见下.

Grid Points :指定需计算的层流小火焰的数量。

Grid Center Point ：是一个小于 0.9 大于 0.1 的无量纲参数，是接近 Start 或 End 处的标量耗散值的组合。对等空间标量耗散，设定为 0.5.当使用大的 End 标量耗散时,Start 的标量耗散值应当在 0.1 到 0.5 之间。在小火焰文件中，最大标量耗散值(End

χ_{st})应当是熄火极限时的标量耗散; 例如,反应能够进行条件下的值.熄火条件下的标量耗散值由燃料和氧化剂的组成，压力，化学模型所决定，因此，所确定的值对诸如小火焰模型计算中的混合分数梯度的计算参数的值非常敏感。

通过一系列的相关计算和检验，可以预估在熄火极限处的标量耗散的值。

!! 不可在复合小火焰文件中包括一个已经熄火了的小火焰（如未燃烧的）. 最后一个小火焰应当是处于熄火极限的的小火焰，而不能是已经熄火了的.

应当注意到，反应中的标量耗散值有可能大于或小于熄火极限处的值。.如果反应流中标量耗散值明显小于熄火极限值，小火焰文件中的最大标量耗散值会明显高于流体区域中标量耗散值的最大值。

你可以通过以下方法估计流体反应区域的标量耗散值:

1.在 FLUENT 通过平衡方程解。以后，就可以在新的层流小火焰模型 PDF 文件中，将解的值作为层流小火焰模型的初始值。
2. 使用由 RHS 定义的被称作 mean-scalar-dissipation **的方程**， 见方程 14.4-4,决定函数中的最大值

你一可以选择是否使用 Differential Diffusion 和 Include radiation 选项.详见第 14.4.4 节。

确定了小火焰参数, 在 Flamelet Generation 面板点击 Apply 确定所做的设置。prePDF 自动计算化学混合分数的 近似值。, Stoichiometric f. 应当注意的是，Stoichiometric f 是最大平衡温度处的混合分数，是实际化学混合分数的近似值。

在计算层流小火焰以后(见下面的第五步)，prePDF 会自动将小火焰的值输入到标准小火焰文件中去，读入小火焰，在 PDF 表中列出。如果结果发散，你可以在 Solution Controls 调整 Initial CFL 和 Multiply factor 的值以控制运算。第一时间步长就是通过 Initial CFL 复合得到的直接扩散稳定极限时间步长的计算值。，应当降低 Initial CFL。后续的时间步长继续乘以因子. 如果在第一时间（初始时间）步长之前结果发散就发生了，降低因子。

Step 2d:定义小火焰的工作条件

你可以在 Operating Conditions 面板中选择进口流的工作压力和温度。

Setup →Operating Conditions...

如果你是在计算非绝热的小火焰，你应当如下输入 Nonadiabatic Flamelet Temperature Limits:

Min. Temperature 是全局性的允许的最小温度 T_{MIN} ，计算公式见 14.4-8。

Max. Temperature 是计算域中的最大边界的值 T_{MAX} （热壁面和来流）。公式见 14.4-9.

Temperature Drop ΔT^{-}）。

Temperature Increase 是计算域内能够接受的由于得热而产生的最大温升（公式 14.4-9 中的 ΔT^{+}

默认的 Temperature Drop 为 1500 K，这对对多数炭氢化合物燃烧都是适用的。如果边界条件为中等强度的热随时，这个值可以减小一些。对于有关极端温度条件下的问题，必须增加 Temperature Drop and Temperature Increase 值.你可以使用命令行 non-premixed-combustion-parameters 并设定 Enable checking of PDF table temperature limits? 为 yes 来检查是否在 PDF 列表中。

define →models →species →non-premixed-combustion-parameters

关于设定工作条件，详见第 14.3.1 节。

Step 3: 设定 PDF 列表参数

一旦你定义了小火焰之后，接下来就用面板 Solution Parameters 来定义 PDF 列表参数。

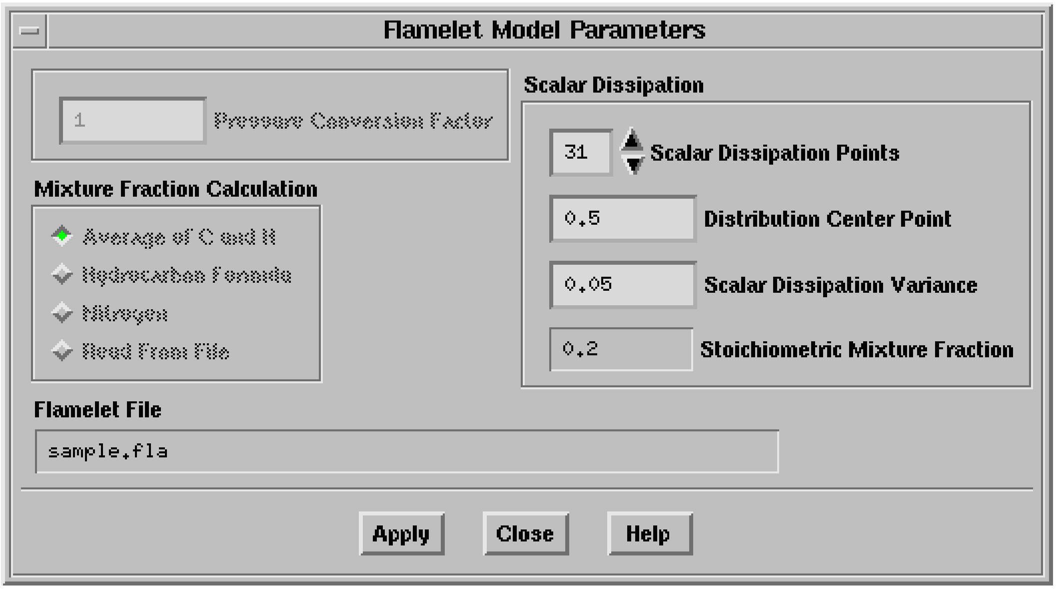
Setup →Solution Parameters...

在 Fuel Mixture Fraction 中，Fuel Mixture Fraction Points 和 Fuel Mixture Fraction Variance Points 的值. 推荐使用缺省的 Automatic Distribution 值。关于这些参数，详见 14.3.1

对于绝热的小火焰问题，要继续在面板 Flamelet Parameters（图 14.4.4）设置标量耗散参数.

Setup →Flamelet Parameters...

Figure 14.4.4: The Flamelet Model Parameters Panel



在 Scalar Dissipation 中，设定 Scalar Dissipation Points 的值要与你在 PDF 选项列表（Solution Parameters 面板中的 Fuel Mixture Fraction Points ）中设定的混合分数的值近似相等。可以通过修正 Distribution Center Point 来群集平均标量耗散的分布。最后，如果你想使用双 δ 假定模型的 PDF，将 Scalar Dissipation Variance 的值设定为大于 0 的一个数。请注意，标量耗散因子的假定 PDF 选项只能在绝热附和小火焰模型中使用。

!! 如果你设定 Scalar Dissipation Variance 为 0，你将在标量耗散中完全忽略紊流脉动的影响，例如平均标量耗散值和瞬时标量耗散值相等。

Step 4: 保存输入的文件

接下来，你可以通过 File/Write/Input... 菜单选项保存你所做的设置。

File →Write →Input...

如果你想在以后看你所做的设置，这一步就非常重要。因为设置过程在 PDF 中并不自动存储你所做的设置。

Step 5: 计算

Calculate/Flamelet 菜单计算。

Calculate →Flamelet

prePDF 会立即提醒你输入小火焰的文件名。当计算完成以后，层流小火焰的数据自动写入这个文件。存储的格式为标准格式。如下面所描述的，这个文件可以被读入或于其他同类型的文件相合并。

指定了文件名以后，prePDF 开始计算，在命令行窗口先是计算过程。 在计算之前， prePDF 会自动在你的工作目录中写入一个叫 FLAMELET.MON 的镜像文件。这个文件包括相关的热力学积化学性质的数据，在监视和查错的过程中非常有用。计算完成以后， prePDF 会自动将 flamelet 写入磁盘，形成 PDF 文件。

如果计算结果是发散, 在 Flamelet Generation 面板中向 0 的方向减小 Initial CFL， 向 1 的方向调整 Multiply factor,重新计算。

Step 6: 保存 PDF 文件

在 prePDF 计算完成以后，你可以保存之。详见第 14.3.1 节。

File →Write →PDF...

!! 以后你可以重新读入以进行后处理。但是，除非你读入原始的小火焰文件，否则你不能够修改解的参量。

由于对于复合小火焰而言，PDF 列表是三维的， 对瞬时的物理特性和 PDF 的整体物理特性可进行观察视角方面的操作。具体操作如下.

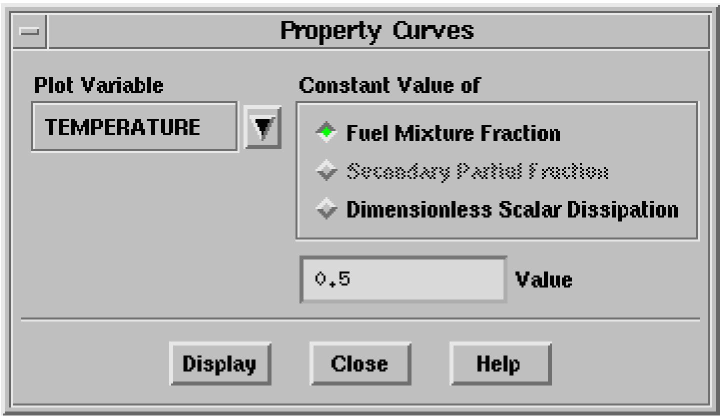
当你对 PDF 文件满意并保存了之后，你就可以在 FLUENT 中继续非预混燃烧的建模过程了。在 FLUENT 中建立和求解一个以小火焰为基础的模型的过程和其他非预混燃烧模型一样的。详见第 14.3.3 节。

Step 7a: **绝热复合小火焰文件的预处理**

观察瞬时值

当你使用图 14.4.5 中所示的 Property Curves 描绘瞬时值。可以绘出制定的变量为 Dimensionless Scalar Dissipation **的常数值**。(你也可以绘出指定变量为混合分数的常数值 Display →Property Curves...

Figure 14.4.5: The Property Curves Panel



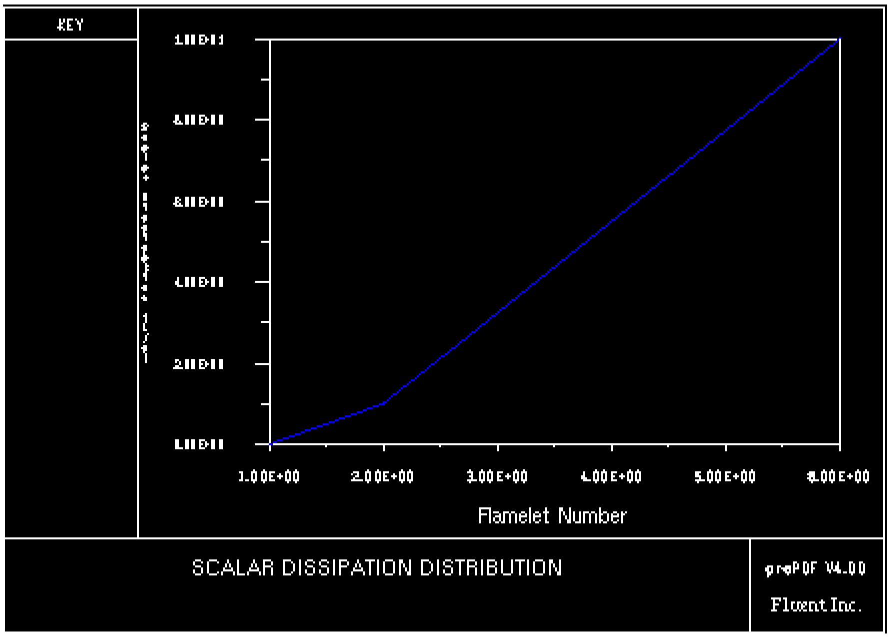
绘出标量耗散分布

你可以通过 Display/Scalar Dissipation 菜单选项来绘制标量耗散分布图。

Display →Scalar Dissipation

图 14.4.6 显示了一个标量耗散分布图

Figure 14.4.6: Scalar Dissipation Distribution

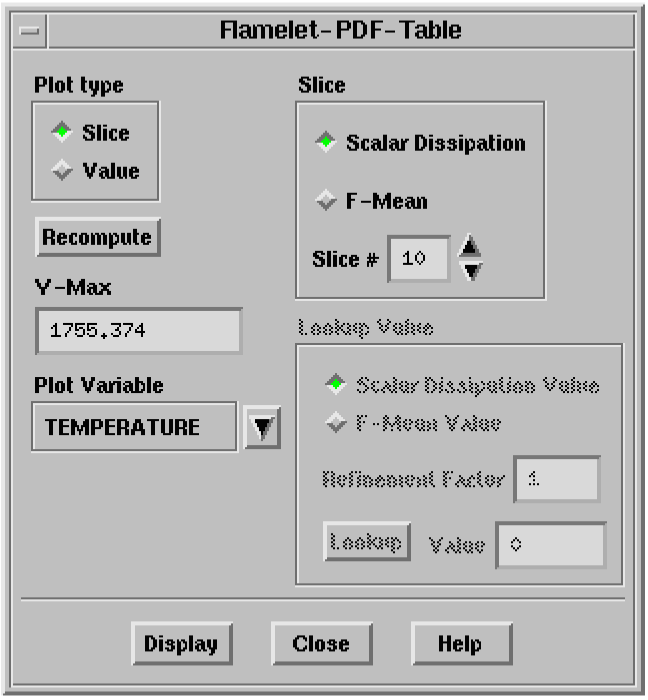


检查 3D 小火焰 - PDF 表

对复合小火焰模型而言,你可以使用 Flamelet-PDF-Table 面板，观察 3D 小火焰 -PDF 表的切面。如图 14.4.7。

Display →Flamelet PDF Table...

Figure 14.4.7: The Flamelet-PDF-Table Panel

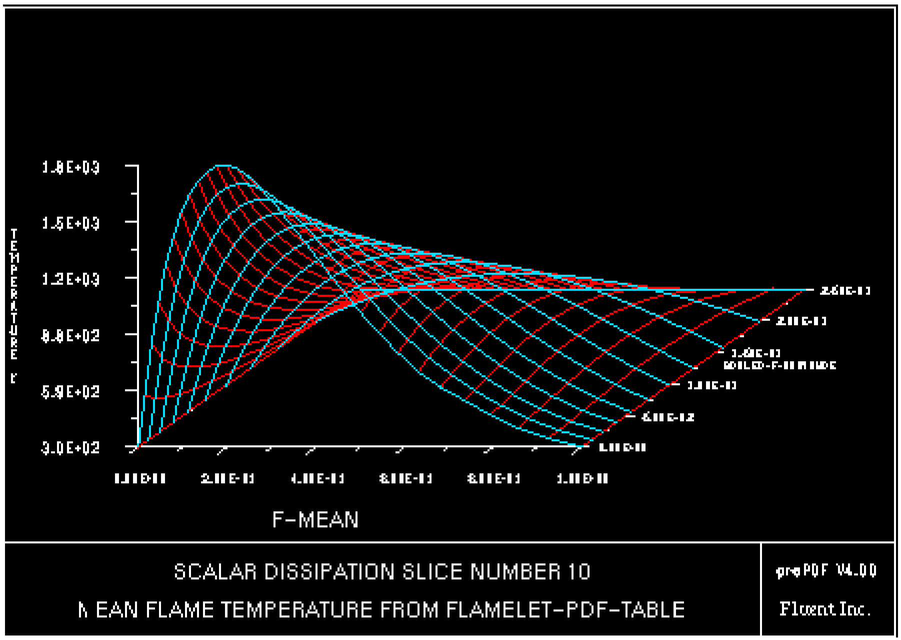


在由复合小火焰系统得到的查询菜单把平均温度，密度及物质分数认为是由三个量：平均混合分数，平均混合分数变化率和无量刚标量耗散所组成的函数。因此，当你想在 prePDF 显示查询表时， 你得到的将是一层一层的显示结果。

在 Flamelet-PDF-Table 面板中,你可以在 Plot Variable 下拉菜单中选择需要显示的变量。接下来，你要定义在查询列表中可用的数据点的三维矩阵如何观察。

如果你定 Slice 为 Plot type 型，你应当选定离散化的变量(Scalar Dissipation 或 F-Mean)为常数，接着确定 Slice # (离散量列表).例如图 14.4.7 显示的图，是由第十个标量耗散的离散值得到的图。左击 Display 就会得到图 14.4.8.

Figure 14.4.8: Display of a Single Slice of a 3D Flamelet-PDF Table



你可以间隔地指定一个自变量地特定值并得到相应的图。但要选择 Value 作为 Plot 的类型. 你可以根据设为定值的 Scalar Dissipation Value 或 F-Mean Value 来得到所要求的图, 在 Value 框中指定所选定变量的值。

接下来，你应当选择 Refinement Factor, 这个因子决定了曲线的精度。默认的 Rrefinement factor of 为 1.0。这是指你将使用和在 Solution Parameters 面板中确定的值相同。增加这个因子会使 prePDF 计算并显示更多的点,因而要得到更加平滑的曲线的计算的时间会变大。最后，点击 Lookup 按钮确认，点击 Display 来显示所得到的结果。

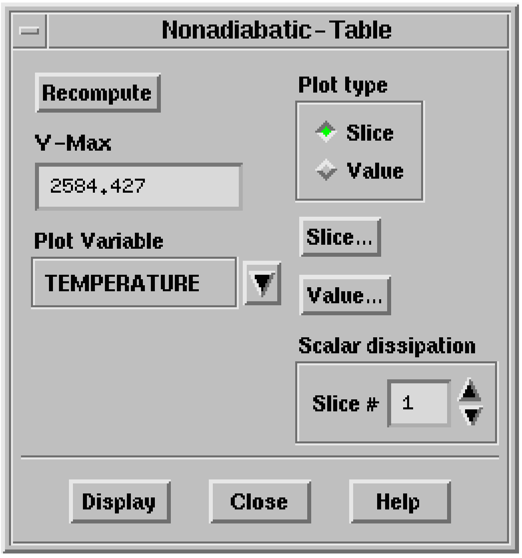
Step 7b: 非绝热复合火焰的后处理

非绝热小火焰 PDF 图

对于非绝热小火焰而言，你可以通过使用如图 14.4.9 的 Nonadiabatic-Tab 面板来观察四维非绝热小火焰的情况。

Display →Nonadiabatic Table...

Figure 14.4.9: The Nonadiabatic-Table Panel for Flamelets



Nonadiabatic-Table 面板同样可用于看非绝热的平衡化学模型的 PDF 图。要使用此面板相见第 14.3.1 节。

对于非绝热小火焰而言，需要其他参数。为了改变平均焓和平均混合分数，你可以改变 Scalar dissipation 下的 Slice #的值改变显示的内容，其内容是四维的。

对于非绝热小火焰 PDF 图而言，你可以如同在绝热层流小火焰模型一样通过使用 Display/Scalar Dissipation 菜单选项来得到标量耗散分数的图。Display →Scalar Dissipation

从导入的层流小火焰文件中得到 PDF 图。

除了要跳过生成小火焰的步骤以外，导入的方法和上面所描述的生成的方法几乎相同。

Step 1: 激活 Flamelet Import

在 Define Case 面板中 （图 14.4.2）, 在 Chemistry models 中选择 Laminar Flamelets 选项。接着在 Heat transfer options 下选择绝热或非绝热选项。最后，在 Flamelet Options 下选择 Import.

Setup →Case...

一旦选择了输入，接下来就要定义模型参数

!!由于在 prePDF 要在读入数据之后，计算混合分数生成菜单，所以你必须在导入文件之前定义参数。

Step 2: 设定 PDF 表的参数

Step 2a: 对非绝热而言

如果你计算的是非绝热燃烧，就需要在 Setup →Operating Conditions... 中设定 Nonadiabatic Flamelet Temperature Limits

Step 2b: Mixture Fraction Table Parameters

接下来设定与混合分数平均值相关的内容。

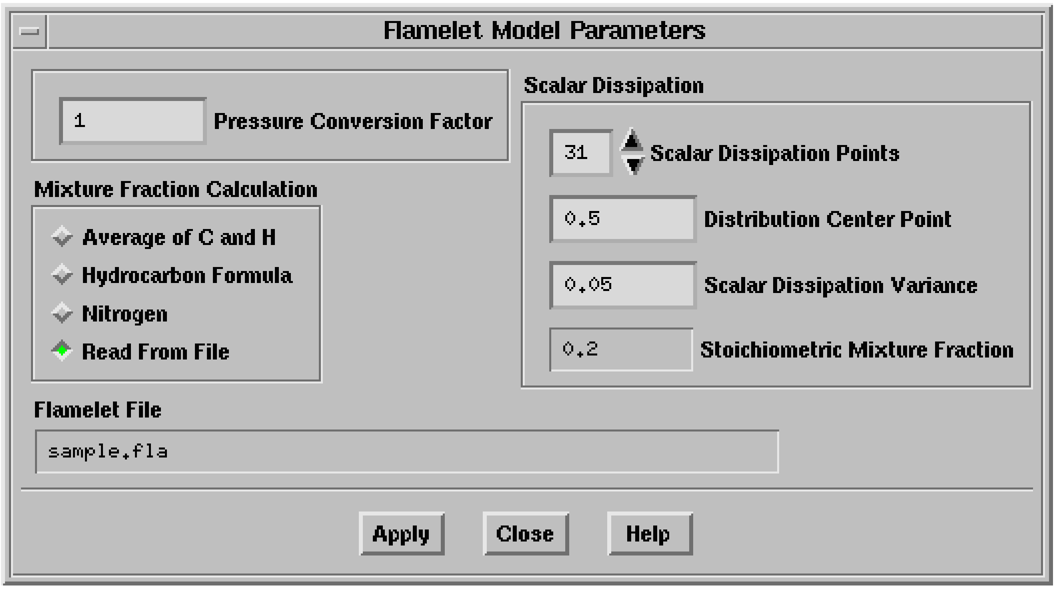
Setup →Solution Parameters...

Step 2c:标量耗散和小火焰变换变量

如果你导入的是在物理空间中产生的小火焰模型，如（用 OPPDIF [147]得到的），prePDF 需要有一个混合分数的文件（相见第 14.4.5 节）。你可以通过如图 14.4.10 的 Flamelet Model Parameters 面板来实现 这一要求

Setup →Flamelet Parameters...

Figure 14.4.10: The Flamelet Model Parameters Panel



导入过程中用到的参数如下：

压力变换因子

指定转换成为 SI 单位的变换因子。如果你读入的是 OPPDIF 类的数据，这个参数应当为 1，这是因为在 OPPDIF 压力的单位就是 Pa. 如果读取的是标准格式的小火焰文件，那你就要设定相应的变换因子以使压力的单位变为 Pa。

混合分数的计算

指定在第 14.4.5 节中所提到的计算方法来就算混合分数。Read From File 是缺省的操作，我们推荐使用缺省值。如果在小火焰文件中不包括混合分数的数据，prePDF

回报错并自动使用 Hydrocarbon 公式。

Step 3: 读入 Flamelet 文件

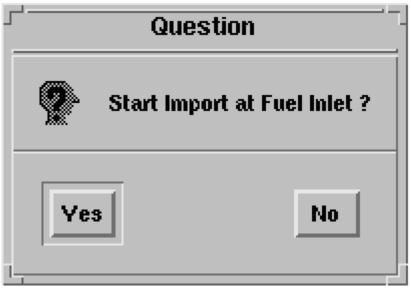
设定参数完参数以后，就可以导入文件了。对于 OPPDIF 形式的使用 File/Import/Oppdif Flamelets... 菜单选项：

File →Import →Oppdif Flamelets...

对于标准格式的文件，使用 File/Import/Standard Flamelets... 菜单选项:

File →Import →Standard Flamelets...

在指定了要读入的标准格式的文件的文件名以后， prePDF 会问你混合分数的值是不是开始升序排列的(从氧化剂进口处)，或降序排列（从燃料进口处开始的）。默认值是降序。



读入文件了以后,prePDF 会报告出物质参数并将整合 β PDF 从而得到 PDF look-up 表。

如果文件中的物质的种类多于 prePDF 中所允许的最大值，物质混合分数最小物质将被忽略。就会得到温度曲线并离散焓的范围。此后， PDF 就会进行整合。值得注意的是，这个过程需要花费一定的时间，从而得到四维的表来。

Step 4:保存并对 PDF 进行后处理

prePDF 完成了 PDF 计算以后，以就可以通过 File/Write/PDF...来保存。在第 14.3.1 节有详细的描述。

File →Write →PDF...

!! 你可以在以后重新读入备份的 PDF 文件到 prePDF 以进行后处理。你可以读入当不能修改。PDF 查询数据表的后处理和 PDF 数据表的后处理是相同的。

将单独的小火焰文件合并成复合小火焰文件

如果你有一系列的单个小火焰文件，你就可以使用 prePDF 来合并之，组成复合小火焰文件。接着就可以在 prePDF 中读取这个文件。

要执行合并操作，你得使用命令行命令 MERGE-FLAMELETS.

FLAMELET-MODEL →MERGE-FLAMELETS

首先要指定目标文件名和将被合并的文件的个数。接着确定被合并的文件的文件名。当输入了所有文件的文件名以后，prePDF 就合并文件并输出结果。

!! 如果你的文件有后缀名，请确定你是否输入了完整的文件名。

如果你所有的是标准形式的单小火焰文件，那么就必须使用文本编辑器或 UNIX cat 命令合并文件，而不是在 prePDF 中合并。

小火焰模型的相关文件

在本节中，介绍了在生成和导入小火焰模型中所使用的标准小火焰文件的相关信息,在小火焰文件产生中使用的 CHEMKIN [112] 化学性质的信息。由 OPPDIF 软件 [147] 或 以 OPPDIF 格式存储的形式是二进制，因此格式化的内容与之并不相关。

基本热力学数据库和运输数据库

要在 prePDF 使用的基本热力学数据，就必须使用 THERMO.DB 这个文件的。在 prePDF 的工作环境中必须有 THERMO.DBT 这个数据库文件或者使用环境变量 THERMODB, 来指定这个文件所存在的位置。

大部分情况下，你要使用由 Fluent 公司提供的软件来运行 prePDF，FLUENT 会使用你所设置的环境变量。

标准格式的小火焰文件

标准格式文件的数据结构是以每个数据段的关键词的顺序为基础排列的。如果在你的数据文件中要是有些关键词与所支持的关键词并不匹配，就需要手工修改成能够支持的形式。(在 prePDF 小火焰模型中，其过滤功能要求的并不是非常严格，所以你不用过分担心。)

这是在 prePDF 支持的关键词:

- 头: HEADER
- 主体: BODY
- 物质的种类: NUMOFSPECIES
- 网格点数： GRIDPOINTS
- 压力: PRESSURE
- 应变率： STRAINRATE
- 标量耗散: CHI

- 温度: TEMPERATURE 和 TEMP
- 物质分数: MASSFRACTION-
- 混合分数: Z

实例:

下面是一个标准格式的小火焰文件。请注意，并没有列出所有物质。

```
HEADER
STRAINRATE 100.
NUMOFSPECIES 12
GRIDPOINTS 39
PRESSURE 1.
BODY
Z
  0.0000E+00  4.3000E-07  2.1780E-06  1.2651E-05  7.8456E-05
  2.1876E-04  5.9030E-04  9.4701E-04  1.4700E-03  1.8061E-03
  2.1967E-03  2.6424E-03  3.1435E-03  4.3038E-03  5.6637E-03
  8.9401E-03  1.2800E-02  1.7114E-02  2.1698E-02  2.6304E-02
  2.8522E-02  3.0647E-02  3.2680E-02  3.4655E-02  4.2784E-02
  5.2655E-02  6.5420E-02  8.2531E-02  1.0637E-01  1.4122E-01
  1.9518E-01  2.8473E-01  4.4175E-01  6.6643E-01  8.6222E-01
  9.5897E-01  9.9025E-01  9.9819E-01  1.0000E+00
TEMPERATURE
  3.0000E+02  3.0013E+02  3.0085E+02  3.0475E+02  3.2382E+02
  3.5644E+02  4.3055E+02  4.9469E+02  5.8260E+02  6.3634E+02
  6.9655E+02  7.6268E+02  8.3393E+02  9.8775E+02  1.1493E+03
  1.4702E+03  1.7516E+03  1.9767E+03  2.1403E+03  2.2444E+03
  2.2766E+03  2.2962E+03  2.3044E+03  2.3027E+03  2.2164E+03
  2.0671E+03  1.8792E+03  1.6655E+03  1.4355E+03  1.1986E+03
  9.6530E+02  7.5025E+02  5.7496E+02  4.4805E+02  3.6847E+02
  3.2730E+02  3.0939E+02  3.0248E+02  3.0000E+02
MASSFRACTION-H2
  3.2354E-07  7.4290E-07  1.6979E-06  3.8179E-06  8.3038E-06
  1.2219E-05  1.7873E-05  2.1556E-05  2.5872E-05  2.8290E-05
  3.0888E-05  3.3684E-05  3.6720E-05  4.3768E-05  5.4359E-05
  1.0484E-04  2.6807E-04  6.1906E-04  1.2615E-03  2.3555E-03
  3.1422E-03  4.1281E-03  5.3302E-03  6.7434E-03  1.4244E-02
  2.4296E-02  3.7472E-02  5.5159E-02  7.9788E-02  1.1573E-01
  1.7135E-01  2.6359E-01  4.2527E-01  6.5658E-01  8.5814E-01
  9.5775E-01  9.8996E-01  9.9814E-01  1.0000E+00
MASSFRACTION-CH4
      .           .            .            .            .
      .           .            .            .            .
      .           .            .            .            .
```

```
     .           .           .           .           .
MASSFRACTION-O
  6.8919E-10  2.8720E-09  1.1905E-08  4.8669E-08  2.0370E-07
  5.5281E-07  1.7418E-06  3.6996E-06  8.3107E-06  1.3525E-05
  2.2484E-05  3.8312E-05  6.6385E-05  1.8269E-04  4.4320E-04
  1.4284E-03  2.7564E-03  3.9063E-03  4.3237E-03  3.7141E-03
  3.0916E-03  2.3917E-03  1.7345E-03  1.2016E-03  2.4323E-04
  5.2235E-05  1.1469E-05  2.3011E-06  3.7414E-07  4.2445E-08
  2.7470E-09  8.7551E-11  2.9341E-12  7.0471E-13  0.0000E+00
  7.2143E-14  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
```

缺少的物质

prePDF 会检查是不是小火焰模型中的所有的物质种类都存在于 THERMO.DB a 和 thermodb.scm. 如果在小火焰文件的物质中有一个在数据库文件中并不存在，那么 prePDF 将会报错并停止运算。如果发生这种情况，你可以在数据库中添加这种物质（详见第 14.5 节），也可以从小火焰文件中删除这种物质。

只有物质的浓度很小（小于 10^{-3}），你才能够从小火焰文件中删除这种物质。如果你删除了一种物质，你就不必在 FLUENT 计算中激活这物质，而 FLUENT 计算的精度并没有受到影响。

!! 如果你删除了一种物质，就一定要在小火焰文件中修改物质种类总数量（关键词 NUMOFSPECIES）。

如果在 prePDF 数据库中所缺的是一种浓度较高的物质，你就要在数据库中加入这种物质了（详见第 14.5 节）. 我们不推荐使用删除浓度高的物质的这种做法。

小火焰数据文件中的排序

小火焰文件中的数据按升序（从氧化剂进口开始，f=0 处）或降序排列（从燃料进口出开始 f=1）混合分数。在你到入文件的时候，prePDF 会问你以何种顺序排列。

化学性质文件

在计算单小火焰的计算中，需要以一些化学性质文件为基础。化学性质文件是按标准的 CHEMKIN 格式写出的，可以在下列路径中找到:

path/Fluent.Inc/prepdf4.*x* /db/

这里的 *path* 是你安装 Fluent Inc 所在的路径。变量 *x* 是与你的 prePDF 的版本相对应的数，例如 0 代表 prePDF 4.0.

在小火焰模型计算中，最大可以包括 100 种物质。如果须计算的物质的数量超过 n（这里的 *n* 是在 Memory Allocation 面板中所指定的最大值），prePDF 会自动在所有的物质中选择密度最大的 n 种物质而舍去其他。

化学性质物件的说明

下面所举的是简要的描述性化学性质文件，仅供参考的。由主要燃料，结构名和化学反应的总个数来确定文件的文件名，并以.che 为后缀名.

skeletal25.che:

轮廓（Skeletal）机理的甲烷燃烧，17 种物质，25 个可逆反应（如果分别计算正反应和逆反应，就有 35 种反应了）。

kee58.che:

Kee 机理的甲烷燃烧. 18 物质 58 个可逆反应。。

glarborg152.che:

与 C_2 相似的碳氢化合物 Glarborg 机理燃烧 33 中物质，152 种可逆化学反应。

methanol40.che:

甲醇燃烧机理。这种机理具体包括含有 H_2-O_2 链反应， HO_2 的生成和消耗，H_2O_2 的生成和消耗，再结合反应， CO-CO_2 机理, CHO 的消耗, CH_2O 的消耗, CH_2OH 消耗, and CH_3OH 消耗. 16 种物质， 40 种反应。见 [179]中 p. 263 中的表 1.1 第 16 章。

reduced25.che:

甲烷燃烧的 Skeletal 机理. 17 种物质，25 个可逆反应（如果分别计算正反应和逆反应，就有 35 种反应了）。详见 [220] p. 161 中的表。

drake67.che:

CO-H_2-N_2机理. NOx 化学反应也包括在内。共 22 种物质 67 个可逆反应.表 1。

smooke46.che:

甲烷燃烧. 17 种物质 46 种可逆反应。详见 [53] p. 1787 中的表 7。

heptane42.che:

庚烷燃烧的一种化学动力机理。有 20 种物质和 42 个可逆反应。详见 [29] p.296 中的表 1。

hydrogen18.che:

氢气燃烧机理。9 种物质 18 个反应。详见 [179] 第 10 章和表 1.1。

hydrogen37.che:

氢气燃烧的一种机理。同样包括 Nox 化学反应。13 种物质 37 个反应。详见 [179] p.179 中的表 11.1。

14.5 在 prePDF 数据库中添加新物质

prePDF 使用 CHEMKIN 数据库（THERMO.DB） [112]来存储物质的热力学参数，在 [112]中有关于参数和格式方面的要求。如果你要添加一种新的物质，你需要在 THERMO.DB 中添加相关的数据，同样也要在 FLUENT 的数据库文件 thermodb.scm 添加相关数据。

你可以使用 prePDF 来生成所需要的 thermodb.scm 文件:

1. 推测在 prePDF 的表中所要添加的物质及要生成新的 THERMO.DB 数据库文件.
2. 用缺省文件名（prepdf.scm）生成一个 FLUENT 的性质文件

File →Write →Thermodb...

3. 接下来你有两种选择：

- 把 prepdf.scm 重命名为 thermodb.scm,并从 thermodb.scm 所在的路径执行 FLUENT。
- 把新编辑的 thermodb.scm 文件存到：

path /Fluent.Inc/fluent6.*x*/cortex/lib/ 中去。

（这里的 path 是 FLUENT 的安装路径，变量 x 是相应的版本号，例如 0 是指 fluent6.0）。一定要小心，必须保证表被圆括号括了起来，同时要保证你的文件中没有插入 carriage-returns，否则会破坏文件的完整性。我们强烈推荐在改动之前做个 thermodb.scm 的备份。

第十五章　预混燃烧模拟

FLUENT 有一个预混湍流燃烧模型，基于反应过程参数方法。有关这一模型的内容按以下节次给出：

- 15.1　概述和限制
- 15.2　预混燃烧模型
- 15.3　使用预混燃烧模型

15.1　概述和限制

15.1.1　概述

在预混燃烧中，燃料和氧化剂在点火之前进行分子级别的混合。火焰前锋传入未燃烧的反应物产生燃烧。预混燃烧的例子有吸气式内燃机，稀薄燃气轮机的燃烧器，气体泄露爆炸。

预混燃烧比非预混燃烧更难以模拟。原因在于（亚音速）预混燃烧通常做为薄层火焰产生，并被湍流拉伸和扭曲。火焰传播的整体速率受层流火焰速度和湍流涡旋控制。层流火焰速度由物质和热量逆流扩散到反应物并燃烧的速率决定。为得到层流火焰速度，需要确定内部火焰结构以及详细的化学动力学和分子扩散过程。由于实际的层流火焰厚度只有微米量级或更小，求解所需要的开销是不可承受的。

湍流的影响是使传播中的层流火焰层皱折、拉伸，增加了薄层的面积，并因此提高了火焰速度。大的湍流涡使火焰层皱折，而小的湍流涡，如果它们比层流火焰的厚度还小，将会穿过火焰层并改变层流火焰结构。

与之相比，非预混燃烧可以极大地简化为一个混合问题（例如，14.1节中介绍的混合物组分方法）。预混燃烧模拟的要点在于捕获湍流火焰速度，它受层流火焰速度和湍流的影响。

在预混火焰中，燃料和氧化剂在进入燃烧设备之前已经紧密混合。反应在燃烧区发生，这一区域将未燃烧的反应物和燃烧产物隔开。部分预混火焰具有预混和扩散火焰两方面的性质。它们发生在有额外的氧化剂或燃料气流进入预混系统，或是当扩散火焰离开燃烧器以在燃烧前产生某些预混的情况。

预混和部分预混火焰FLUENT的有限速率公式(见13章)模拟。还可以参阅16章了解更多有关FLUENT部分预混燃烧模型方面的信息。如果火焰是完全预混合的，则只有一股具有单一混合比的气流进入燃烧器，可以使用预混燃烧模型。

15.1.2　限制

在使用预混燃烧模型时有以下限制：

- 必须使用非耦合求解器。预混燃烧模型在两种耦合求解器中都不能得到。
- 预混燃烧模型只对湍流、亚音速模型有效。这一类型的火焰成为爆燃。在爆炸中，可燃混合物被冲击波后面的热量点燃，这一类型的燃烧可以使用非耦合和耦合求解器用有限速率模型模拟。有关限速率模型见 13 章。
- 预混燃烧模型不能和污染物（如碳烟和 NOx）模型一起使用。但完全预混系统可以用部分预混模型（见 16 章）模拟。
- 不能用预混燃烧模型模拟反应的离散相粒子。只有惰性粒子可以使用预混燃烧模型。

15.2　预混燃烧理论

湍流预混燃烧模型基于 Zimont 等人的工作[275，276，278]，涉及求解一个关于反应过

程变量的输运方程。这一方程的封闭基于湍流火焰速度的定义。

15.2.1 火焰前锋的传播

在许多工业预混系统中，燃烧发生在一个非常薄的火焰层中。当火焰前锋移动时，未燃的反应物燃烧，变为燃烧产物。因此预混燃烧模型用火焰层将反应的流场分为已燃物区和未燃物区。反应的传播等同于火焰前锋的传播。

火焰前锋传播的模拟通过求借一个关于标量 c 的输送方程，c 为（Favre 平均）反应进程变量。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c)+\nabla\cdot(\rho\vec{v}c)=\nabla\cdot\left(\frac{\mu_t}{\mathrm{Sc}_t}\nabla c\right)+\rho S_c \qquad (15.2\text{-}1)$$

其中 c 为反应进程变量；

Sc_t 为梯度湍流流量的施密特数；

Sc 为反应进程源项(s^{-1})

进程变量定义为：

$$c=\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i}{\sum_{i=1}^{n}Y_{i,\mathrm{ad}}} \qquad (15.2\text{-}2)$$

其中，n 为产物数量；

Y_i 为第 i 种物质的质量分数；

$Y_{i,ad}$ 为经过绝热完全燃烧后第 i 种物质的质量分数。

根据这一定义，混合物燃烧前 $c=0$；混合物燃烧后 $c=1$。

在所有的流动入口，将 c 定义为边界条件，要么是0，要么是1；

方程15.2-1中的平均反应速率在[276]进行了建模：

$$\rho S_c=\rho_u U_t|\nabla c| \qquad (15.2\text{-}3)$$

其中，ρ_u 为未燃混合物密度；

U_t 为湍流火焰速度。

存在其他反应速率模型[27]，并且可以指定用户定义的函数。参见UDF手册获取用户定义函数的详细资料。

15.2.2 湍流火焰速度

预混燃烧模型的关键是 U_t，即垂直于火焰表面的湍流火焰速度的预测，湍流火焰速度受以下因素影响：

- 层流火焰速度，因此由燃料浓度、温度和分子扩散性质以及化学动力学的决定；

- 大涡引起的火焰前锋皱折和拉伸，小涡引起的火焰前锋加厚。

在FLUENT中，通过这样一个关于起皱和加厚了的火焰前锋的模型来计算湍流火焰速度[276]：

$$U_t = A(u')^{3/4} U_l^{1/2} \alpha^{-1/4} \ell_t^{1/4} \quad (15.2\text{-}4)$$

$$= Au' \left(\frac{\tau_t}{\tau_c}\right)^{1/4} \quad (15.2\text{-}5)$$

其中，A——模型常数；

u'——均方速度(m/s)；

U_L——层流火焰速度(m/s)；

$\alpha = k/\rho c_p$——未燃混合物的摩尔传热系数（热扩散）(m^2/s)；

l_t——湍流长度尺度；

$\tau_t = l_t / u'$——湍流时间尺度(s)；

$\tau_c = \alpha / U_l^2$——化学反应时间尺度

湍流长度尺度τ_t可以由下式计算：

$$\ell_t = C_D \frac{(u')^3}{\epsilon} \quad (15.2\text{-}6)$$

其中ε为湍流耗散速率。

模型基于火焰团内小尺度湍流平衡假定，导致了一个只与大尺度湍流参数有关的湍流火焰速度表达式。文献[276]中推荐 A 的缺省值为 0.52，对于大多数预混火焰都是适合的。缺省的C_D值为 0.37，对于大多数预混火焰也是适合的。

当流动中最小的湍流涡(Kolomogrov尺度)小于火焰厚度，并穿过火焰区时，这一模型确实是适用的，这称为反应区，燃烧区，并且可以用Karlovitz数Ka来数量化，Ka大于1，定义为：

$$\mathrm{Ka} = \frac{t_l}{t_\eta} = \frac{v_\eta^2}{U_l^2} \quad (15.2\text{-}7)$$

其中，t_l——火焰特征时间尺度；

t_η——最小（Kolomogrov 尺度）湍流时间尺度

$v_\eta = (\nu\varepsilon)^{1/4}$——Kolomogrov 速度

υ ——动力粘度

最后，模型对于火焰扫过的宽度随时间增加的预混系统是有效的，这一系统在常见于工

业燃烧器中。经过长时间传播后，火焰接近于不变的宽度，在这一模型中不能得到。

LES 的湍流火焰速度

对于使用 LES 湍流模型的模拟，湍流火焰速度表达式(方程 15.2-4)中的雷诺平均量用它们等价的亚网格量来替代。特别是大涡长度尺度 l_t 的模型为：

$$\ell_t = C_s \Delta \qquad (15.2\text{-}8)$$

其中 C_s 为Smagorinsky常数，Δ 为单元特征长度。

方程15.2-4中的RMS速度用亚网格速度波动代替，按下式计算：

$$u' = \ell_t \tau_{sgs}^{-1} \qquad (15.2\text{-}9)$$

其中 τ_{ags} 为亚网格尺度混合速率（时间尺度），由方程 13.1-27 给出。

火焰拉伸效应

由于工业上低排放的燃烧器常工作在接近稀薄吹熄极限附近，火焰拉伸将对平均湍流热释放强度具有重要的影响。为了将这种火焰拉伸考虑进去，进程变量的源项(方程 15.2-1 中的 S_c)乘上了一个拉伸因子 G [278]。这个拉伸因子表示了拉伸不会使火焰淬熄的可能性；如果没有拉伸（G=1），火焰不会淬熄的可能性为 1。

拉伸因子可以通过积分湍流扩散速率 ε 的自然对数分布得到。

$$G = \frac{1}{2}\text{erfc}\left\{-\sqrt{\frac{1}{2\sigma}}\left[\ln\left(\frac{\epsilon_{\text{cr}}}{\epsilon}\right) + \frac{\sigma}{2}\right]\right\} \qquad (15.2\text{-}10)$$

其中 $erfc$ 是补充误差函数，σ 和 ε_{cr} 的定义如下：

σ 为 ε 分布的标准差，

$$\sigma = \mu_{\text{str}} \ln\left(\frac{L}{\eta}\right) \qquad (15.2\text{-}11)$$

其中 μ_{str} 为耗散脉动的拉伸因子系数，L 湍流积分长度尺度，η 为 Kolmogorov 微尺度。文献[276]推荐的 μ_{str} 的缺省值为 0.26（在无反应流动中测得），对于大多数预混合火焰都适用。

ε_{cr} 为在应力处于临界变化率时的湍流耗散速率。[276]

$$\epsilon_{\text{cr}} = 15\nu g_{\text{cr}}^2 \qquad (15.2\text{-}12)$$

缺省时，g_{cr} 设置为一个很大的值（1×10^8），以不产生火焰拉伸。为了包含火焰拉伸效应，应力的临界变化速率 g_{cr} 需要根据燃烧器的实验数据进行调整。数值模型能推荐一个物理上合理值的范围[276]，或者通过实验数据确定一个适当的值。关于临界应力变化速率 g_{cr}

的一个合理的模型如下：

$$g_{cr} = \frac{BU_l^2}{\alpha} \qquad (15.2\text{-}13)$$

其中 B 为常数（典型值为 0.5），α 为热扩散系数。方程 15.2-13 可以通过使用适当的用户定义函数在 FLUENT 中执行。参见 UDF 手册了解有关用户定义函数的细节。

优先扩散

优先扩散是由于在湍流燃烧中燃料分子扩散系数的不同对放热强度的影响产生的。包含这一效应对于轻燃料（如氢）或重燃料（如蒸发的油）的燃烧模拟非常重要。优先扩散的模型基于文献[121]阐述的引导点的概念。文献[121]的作者根据燃料和氧化剂分子扩散系数 D_{fuel} 和 D_{ox} 的差异得出了燃烧区内混合物组成变化的公式。这些公式在文献[278]中重写为：

$$\lambda_{lp} = \begin{cases} \frac{\lambda_0(1+C_{st})d+d-1}{d+C_{st}} & \lambda_{lp} \geq 1 \\ \frac{\lambda_0(C_{st}+d)}{1+\lambda_0 C_{st}+C_{st}(1-\lambda_0 d)} & \lambda_{lp} < 1 \end{cases} \qquad (15.2\text{-}14)$$

其中，

C_{st} 为质量stoichiometric系数；

λ_0 为未燃混合物组成的stoichiometric比；

λ_{1p} 为引导点混合物组成的stoichiometric比。

$$d = \sqrt{\frac{D_{ox}}{D_{fuel}}} \qquad (15.2\text{-}15)$$

通过在层流火焰速度 U_l 或是传热系数 α 的公式中用 λ_{1p} 代替 λ_0，将引导点的概念用于 FLUENT。这种简单的方法在没有使用附加经验参数的情况下，得到了与搅拌燃弹中质量燃烧速率测量结数据一致的结果[278]。

梯度扩散

火焰前锋的容积扩张可以导致反梯度方向扩散。这种效应在反应物的密度与产物的密度比值很大，且湍流强度很小时更加显著。它可以用比值 $(\rho_u / \rho_b)(U_l / I)$ 数量化，其中 ρ_u、ρ_b、U_l 和 I 分别为未燃物密度、已燃物密度、层流火焰速度和湍流强度。这一比值比一大表明具有反梯度方向扩散的趋势，且预混燃烧模型可能是不适当的。最近有关湍流-火焰-速度模型在这一体制下的有效性问题的争论可以在 Zimont 等人的文献中找到[277]。

15.2.3 FLUENT 中的预混燃烧模型公式

根据以上概述的理论，FLUENT 将求解关于反应进程变量 c（方程 15.2-1）的输送方程，计算源项 ρS_c，

$$\rho S_c = AG\rho_u I^{3/4}[U_l(\lambda_{\rm lp})]^{1/2}[\alpha(\lambda_{\rm lp})]^{-1/4}\ell_t^{1/4}|\nabla c| \quad (15.2\text{-}16)$$

$$= AG\rho_u I\left[\frac{\tau_t}{\tau_c(\lambda_{\rm lp})}\right]^{1/4}|\nabla c| \quad (15.2\text{-}17)$$

15.2.4 温度的计算

温度的计算依赖于模型是绝热还是非绝热。

绝热温度计算

对于绝热预混燃烧模型，温度假定为在未燃混合物的温度T_u和绝热条件下燃烧产物的温度T_{ad}之间线性变化，

$$T = (1-c)T_u + cT_{\rm ad} \quad (15.2\text{-}18)$$

非绝热温度计算

对于非绝热预混燃烧模型，FLUENT 求解能量输送方程以考虑系统中的所有损失或获得的热量。这些损失/获得可以包括在化学反应产生的热源，或是辐射产生的热损失中。对于完全预混的燃料（见方程 11.2-3），以焓h表示的能量方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla\cdot(\rho\vec{v}h) = \nabla\cdot\left(\frac{k+k_t}{c_p}\nabla h\right) + S_{h,\rm chem} + S_{h,\rm rad} \quad (15.2\text{-}19)$$

$S_{h,rad}$表示由于辐射导致的热损失，$S_{h,chem}$表示由于化学反应得到的热量。

$$S_{h,\rm chem} = \rho S_c H_{\rm comb} Y_{\rm fuel} \quad (15.2\text{-}20)$$

其中，S_c=归一化的平均产物形成速率(s^{-1})

H_{comb}=1kg 燃料燃烧产生的热量（J/kg）

Y_{fuel}=未燃混合物中燃料质量分数

15.2.5 密度的计算

当使用预混燃烧模型时，FLUENT 用理想气体定律计算密度。对于绝热模型，忽略压力的变化，并且假定平均分子质量是常数，这样燃烧或的气体密度可以按以下关系计算：

$$\rho_b T_b = \rho_u T_u \quad (15.2\text{-}21)$$

其中下标 u 代表未燃烧的冷混合物，下标 b 表示燃烧或的热混合物。需要的输入有未燃烧的密度（ρ_u），未燃烧的温度（T_u）和燃烧后的绝热火焰温度（T_b）。

对于非绝热模型，你可以选择在理想气体状态方程中包括或不包括压力的变化。如果你选择忽略压力波动，FLUENT 按下式计算密度：

$$\rho T = \rho_u T_u \quad (15.2\text{-}22)$$

其中T从能量输送方程 15.2-19 计算得到。需要的输入包括未燃烧的密度（ρ_u），未燃烧的温度（T_u）。需要注意的是，根据不可压缩理想气体方程，表达式$\rho_u RT_u / p_{op}$可以视为气体的有效分子质量，其中R为气体常数，p_{op}为工作压力。

如果你希望对可压缩气体包括压力波动，你将需要输入气体的有效分子质量。密度可以从理想气体状态方程计算。

15.3　使用预混燃烧模型

以下将列出设置和求解预混燃烧模型的过程的纲要，然后详细叙述。记住只有与预混燃烧模拟有关的步骤才在这里列出。其它和预混燃烧模型一起使用的模型的输入需要参见这些模型的相应章节。

1．选定预混湍流燃烧模型并设置相关参数。

Define ⟶ Models ⟶ Species...

2．定义区域中未燃材料的物理属性。

Define ⟶ Materials...

3．设置在流动入口和出口的进程变量 c

Define ⟶ Boundary Conditions...

4．初始化进程变量的值

Solve ⟶ Initialize ⟶ Patch...

5．求解问题并进行后处理

！如果你对计算区域中单个物质的浓度感兴趣，你可以使用 16 章中介绍的部分预混模型。这样未燃和燃烧后混合物的组成将通过使用平衡或反应动力学计算得到的外部分析得到。

！见 15.3.8 节有关使用 FLUENT5 中使用预混燃烧例子文件的重要信息。

15.3.1　选定预混燃烧模型

为选定预混燃烧模型，你可以在 Species Model 面板中的 Model 里选择 Premixed Combustion (图 15.3.1)

Define ⟶ Models ⟶ Species...

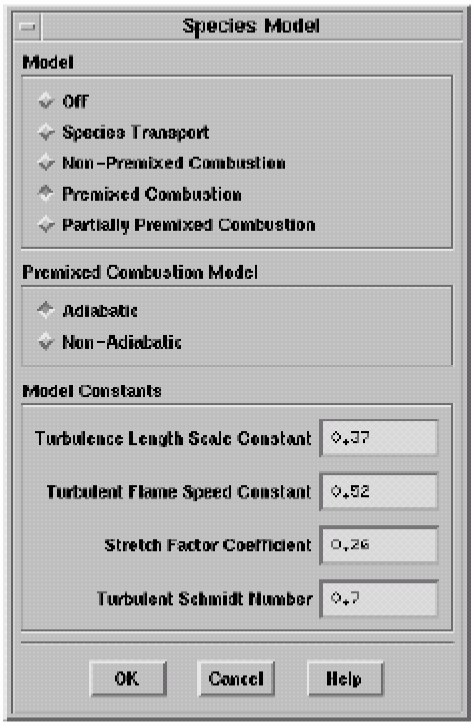


图 15.3.1　预混燃烧的 Premixed Combustion 面板

当你打开 Premixed Combustion 后，面板将扩展以显示相关输入。

15.3.2　选择一个绝热或非绝热模型

在 Species Model 面板的 Premixed Combustion Model 下，选择 Adiabatic（缺省）或 Non-Adiabatic。选择将只影响确定温度的计算方法（方程 15.2-18 或 15.2-19）。

15.3.3　修改预混燃烧模型的常数

通常，你不需要修改 15.2 节中给出方程中的常数。缺省值对于很宽广范围内的预混燃烧都是适用的。但如果你希望对模型常数做某些修改，你可以在 Species Model 面板中的 Model Constants 中找到它们。

你可以设置湍流长度尺度常数(Turbulence Length Scale Constant，　方程 15.2-6 中的 C_D)，湍流火焰速度常数(Turbulence Flame Speed Constant ，方程 15.2-4 中的 A)，拉伸因子系数(Stretch Factor Coefficient ，方程 15.2-11 中的 μ_{str})和湍流施密特数（Turbulent Schmidt Number，方程 15.2-1 中的 S_{ct}）。

对于非绝热预混燃烧模型，注意你指定的湍流 Schmidt 数也将被用为能量的 Prandtl 数。（因此能量 Prandtl 数将不会在非预混燃烧燃烧模型的粘性模型面板中出现）。这些参数控制进程参数和能量扩散的水平。由于进程参数与能量密切相关（因为火焰过程产生放热），输送方程采用相同的扩散水平非常重要。

15.3.4　定义未燃混合物的物理属性

域中的流体材料将被分配未燃混合物的属性，包括摩尔传热系数(方程 15.2-4 中的 α)，它常也被称为热扩散系数，α 定义为 $k/\rho c_p$，以及标准状态时的值，这些值可以在燃烧手

册中找到（如[120]），

对于绝热和非绝热模型，你都需要指定层流火焰速度（方程 15.2-4 中的U_l）做为材料属性。如果你希望在你的模型中包括火焰拉伸效应，你将还需要指定临界应力速率（方程 15.2-12 中的 g_{cr}）。如 15.2.2 节中所讨论的，g_{cr} 缺省时设定为一个很大的值（1×10^8），因而没有火焰拉伸出现。为了包括火焰拉伸效应，你需要根据燃烧器的实验数据调整临界应力速率。由于火焰拉伸和火焰熄灭能影响湍流火焰速度（如 15.2.2 节中所讨论的），精确的预测需要一个临界应力速率的理想值。对于甲烷稀薄预混燃烧，典型的值的范围从 3000 到 8000 s^{-1} [276]。注意你可以指定常数值或用户定义函数来定义层流火焰速度和临界应力速率。参见单独的 UDF 手册了解更多有关用户定义函数的细节。

！见 15.3.8 节获取有关在 FLUENT5 使用预混燃烧 case 文件的重要信息。

对于绝热模型，你还需要指定燃烧产物的绝热温度 Adiabatic Temperature of Burnt Products（方程 15.2-18 中的T_{ad}），即在绝热条件小燃烧产物的温度。这一温度将被用于在绝热预混燃烧计算中确定温度的先行变化。你可以指定一个常数或是用户定义函数。

对于非绝热模型，你需要指定单位质量燃料的燃烧热 Heat of Combustion 和未燃燃料分数 Unburnt Fuel Mass Fraction(方程 15.2-20 中的 H_{comb} 和 Y_{fuel}。FLUENT 将使用这些值计算热损失或燃烧产热，，并将这些损失/获得包括在计算温度的能量方程中。燃烧热 Heat of Combustion 只能指定为常数，但未燃燃料分数 Unburnt Fuel Mass Fraction 可以指定为常数或函数。

为指定预混燃烧模型中的密度，在密度 Density 下拉表中选择预混燃烧，并设置未燃反应物的密度 Density of Unburnt Reaction 和未燃反应物的温度 Temperature of Unburnt Reaction（方程 15.2-21 中的T_u 和 ρ_u）。对于绝热预混模型，你在未燃反应物的温度 Temperature of Unburnt Reaction 中的输入还将用于方程 15.2-18 以计算温度。

其它未燃混合物的指定属性有粘度、比热、热导率以及其它与和预混燃烧模型联合使用的模型有关的参数。

15.3.5 设置进程变量的边界条件

对于预混燃烧模型，你将需要在流动入口和出口设置附加的边界条件：进程变量c，有效的进程变量输入如下：

- c=0：未燃混合物
- c=1:燃烧后的混合物

15.3.6 初始化进程变量

通常，将进程变量c 处处初始化设置为 1(燃烧后)，并允许未燃混合物($c=0$)从入口进入燃烧域将火焰吹回稳定器，已经足够。另一种更好的初始化方法是在火焰保持器的上游插入一个初始值 0(未燃)，在下游区域插入一个值 1（已燃）（已经在求解初始化 Solution Initialization 面板中初始化了流动场）。

Solve → Initialize → Patch...

见 22.13.2 节有关在求解变量中插入值的详细内容。

15.3.7 预混燃烧计算的后处理

FLUENT 提供了几个预混燃烧计算的附加报告选项。你可以产生以下项的图形或文字/数字报告：

- 进程变量
- Damkohler 数
- 拉伸因子
- 湍流火焰速度
- 静态温度
- 产物形成速率
- 层流火焰速度
- 临界应力速率
- 未燃燃料质量分数
- 绝热火焰温度

这些变量包含在预混燃烧 Premixed Combustion…中，即后处理面板中出现的变量选择下拉列表栏。流动变量的完整列表、流场函数和它们的定义见 27 章。25 章和 26 章解释怎样产生图形和数据报告。

注意静态温度和绝热火焰温度只有在绝热预混燃烧计算时才在预混燃烧 Premixed Combustion…栏中出现；对于非绝热计算，静态温度将出现在温度 Temperature…栏中。未燃燃料质量分数 Unburnt Fuel Mass Fraction 将只在非绝热模型中出现。

计算物质浓度

如果你知道模型中未燃和已燃混合物的组成（例如，如果你使用了单步化学动力学计算或是第三方一维燃烧程序的外部分析），你可以用用户场函数计算燃烧域中的物质浓度：

为确定未燃混合物中某种物质的浓度，定义用户函数 $Y_u(1-c)$，其中 Y_u 为这种物质在未燃混合物（由你指定）中的质量分数，c 为进程变量的值（由 FLUENT 计算）。

为确定已燃混合物中某种物质的浓度，定义用户函数 $Y_b c$，其中 Y_b 为这种物质在已燃混合物（由你指定）中的质量分数，c 为进程变量的值（由 FLUENT 计算）。

见 27.5 节有关定义和使用用户场函数的详细内容。

15.3.8 从一个 FLUENT5 预混燃烧实例文件开始

如果你在使用 FLUENT5 中创建的预混燃烧实例文件，你将需要重新输入几个已经移入材料 Materials 面板中属性 Properties 列表的参数值：

- 绝热模型
  - -未燃反应物的密度（以前是Unburnt Mixture Density面板中的未燃混合物密度 Density of Unburnt Mixture）
  - -未燃反应物的温度（以前是Unburnt Mixture Density面板中的未燃混合物温度 Temperature of Unburnt Mixture）
  - -燃烧产物的绝热温度（以前是Species Model面板中的绝热产物温度 Temperature of Unburnt Mixture）
  - -层流火焰速度（以前是Species Model面板中的层流火焰速度Laminar Flame Velocity）

-临界应力速率（以前在Species Model面板中）

- 非绝热模型

-未燃反应物密度

-未燃反应物温度

-燃烧热（以前在Species Model面板中）

-未燃燃料质量分数（以前是Species Model面板中的Fuel Mass Fraction）

-层流火焰速度

-临界应力速率

-

16. 部分预混燃烧的模拟

FLUENT 提供了一个模拟部分预混燃烧的模型，它是基于 14 章讲述的非预混燃烧模型和 15 张讲述的预混燃烧模型的。关于部分预混燃烧模型按以下章节介绍：

16.1 概述和局限
16.2 理论
16.3 使用部分预混模型

16.1 概述和局限

16.1.1 概述

部分预混燃烧系统，是带有不均匀燃料——氧化剂的混合物的预混燃烧火焰。这种部分预混火焰的情形如，预混的混合物喷射到静止的大气中，带有扩散引导火焰或者冷却气喷嘴的贫油预混燃烧，以及不完整的混合进口的贫油预混燃烧室。

FLUENT 提供的部分预混模型是非预混模型（14 章）和预混模型（15 章）的简单结合。预混反应进度变量 c，决定火焰前锋的位置。在焰锋后（c＝1），混合物是燃尽的，所以采用平衡或者….. 的求解方案；在焰锋（c＝0）前，组份质量分数、温度、密度通过未燃烧混合物计算。火焰内部（$0<c<1$），未燃物和已燃物采用线性处理。

16.1.2 局限

非预混和预混模型的基本理论、假设以及各自的局限，直接应用于部分预混模型。特别地，single-mixture-fraction 方法只适用于两个进口的情况，这 2 进口可以是纯燃料、纯氧化剂，或者燃料和氧化剂的混合物。two-mixture-fraction 模型的情况下，进口数目限制延展到三个，但是将带来较大的计算量。更多信息，请参考 14.1.1 和 15.1.2。

16.2 理论

部分混合模型，通过求解一个输运方程来求平均反应进度 $\overline{c}$（以决定焰峰的位置），和混合物组份方程 $\overline{f}$ 和 $\overline{f'^2}$。火焰前方（c＝0），燃料和氧化剂是混合的但未燃烧，火焰后边（c＝1）混合物是燃尽了的。

16.2.1 标量的计算

平均标量（如组份质量、温度和密度），用 $\overline{\phi}$ 表示示，是通过计算 f 和 c 的概率密度函数（PDF）：

$$\overline{\phi} = \int_0^1 \int_0^1 \phi(f,c)p(f,c)\,df\,dc$$

在薄火焰的假设下，于是只有未燃反应物和已燃产物存在，平均标量取决于

$$\overline{\phi} = \overline{c}\int_0^1 \phi_b(f)p(f)\,df \; + (1-\overline{c})\int_0^1 \phi_u(f)p(f)\,df$$

这里下标 b 和 u 分别表示已燃和未燃。

已燃部分的标量，ϕ_b，是混合物的函数，通过组分燃料质量 f 和氧化剂质量（1－f）并使混合物平衡 ϕ_b。当非绝热混合物和／或考虑层流 的时候，ϕ_b 依然是热焓和／或应力的函数，但是这并不改变基本公式。未燃部分的标量，ϕ_u，类似地通过组合燃料质量 f 和氧化剂质量（1－f）来计算，但是混合物没有反应。

就像非预混模型一样，化学计算和为已燃混合物 PDF，在 prePDF 里面执行，FLUENT 已经构建了向上层工作台供使用。

在未燃混合物里忽视了湍流波动（PDF）和非绝热的影响，所以平均未燃物的标量 $\overline{\phi}_u$ 只是 $\overline{f}$ 的函数。这些假设对大多数部分预混燃烧了流动是有效的，做这些假设是为了减少内存需求。未燃的密度、温度、组份质量百分数、比热和热扩散（指示φ）在 prePDF 里面用最小二乘法拟合成 $\overline{f}$ 的三阶多项式。

$$\overline{\phi}_u = \sum_{n=0}^{3} c_n \overline{f}^n$$

由于未燃物标量是平滑变化、并是 $\overline{f}$ 的缓慢变化函数，这些多项式拟合通常很精确。在 prePDF 里面，用户有权改变这些多项式，如果你要改变它们。

16.2.2 层流火焰速度

反应进度模型需要层流火焰速度（公式 15.2-4），层流火焰速度取决于混合物组份、温度以及压力。对很好地预混合系统如 15 章里的，反应流有一种混合物，层流火焰速度在整个火焰域里近似为常数。然而，在部分预混系统里，层流火焰传播速度将随着反应混合物（平很比）的变化而变化，这种变化必须考虑。

精确的层流火焰速度理论上很难确定，通常是通过试验或者一维摸拟计算出来。prePDF 使用拟合曲线 Goyygens［89］来获得层流火焰速度。这些曲线是为氢气、甲烷、乙炔、乙烯、乙烷和丙烷燃烧火焰设计的。进口油气比从贫油极限到化学恰当比、未然物温度从 298k 到 800k，压力从 1 到 40bars 的情况下，这些假设都是有效的。

prePDF 把曲线拟合成为分段线性多项式。富油极限和贫油极限下的油气比也可以确定，并转化为混合物百分比。混合物如果比贫油极限更贫油或者比富油极限更富油的话，将不会燃烧，将出现 0 火焰速度。这要求输入数值 10 倍层流火焰速度。层流火焰速度的最小和最大的 $\overline{f}$ 极限就是输入的第一个和最有一个 $\overline{f}$ 数值。

!! 这些火焰速度对于燃料是纯 H_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6, 和 C_3H_8 是比较精确的。如果氧化剂不是空气或者有其它的的燃料，那么这种曲线拟合是不正确的。虽然 prePDF 缺损是甲烷空气混合物，层流火焰速度多项式和富油或者贫油状态下最可能不正确。层流速度多项式应该由其它项决定，比如别的一些相关文献介绍的测量方法或者详细的 1 维模拟，然后输入到 prePDF。

16.3 使用部分预混燃烧模型

设置和求解部分预混燃烧问题，结合部分非预混和部分预混的设置。16.3.1 中给出了这个过程的大致轮廓，同时还有相应的关于到预混和非预混章节里去查询细节的相关信息。部分预混燃烧模型的特殊的输入，在 16.3.1 和 16.3.2 中介绍。

16.3.1 设置和求解步骤

1、用 prePDF 生成一个 PDF 的查询表。你可以跟着非预混燃烧章节里，14.3.1 或者 14.4.6 讲

述的步骤进行设置，在 define case 面板里，打开 partially premixed model 选项。

Setup →Case...

!! 如果 prePDF 有警告你，在查询计算阶段，任何关于计算层流火焰速度的函数、计算未燃密度、温度、比热和热扩散率的参数，超出范围的参数都是有效的，你必须在保存 PDF 文件前改变多项式系数或者分段线性点的系数。

Display →Partially Premixed Properties...

细节请参阅 16.3.2。

2、读入网格文件到 FLUENT，并设置好其它你计划采用的与部分预混燃烧模型相关的模型（湍流、辐射等）

3、激活部分预混燃烧模型

（a） 打开 Species Model 面板里的 Partially Premixed Combustion 模型。

Define →Models →Species...

（b） 如果必要，改变 Species Model 面板里的 Model Constants（模型常数)。**这些对于预混燃烧模型来说是永恒的常数，很多情况下，你不必改变他们的缺损值。详细情况参见 15.3.2**

（c） **点击 Species Model 面板上的 OK 后，指定包含你在 prePDF 里生成的查询图表的 PDF 文件名，并把它读入 FLUENT。**

4、定义计算域内未燃物质的物理特性

Define →Materials...

FLUENT 将自动地为层流火焰速度选择 **prepdf-polynomial** 函数，指示 PDF 的查询表的分段线性多项式函数将用来计算层流火焰速度。有可以选择用户自定义函数而不是分段线性多项式函数。参见 15.3.4，有关于设定未燃物的其它特性的详细资料。

5、设定进出口的火焰进度变量（c）和平均混合物百分数（$\overline{f}$）和其变异（$\overline{f'^2}$）。（对于那些包含多个进口的，你必须为平均次要进口部分分数定义边界条件以及其变异量）

Define →Boundary Conditions...

参见 14.3.3 节，查看关于指导如何设定混合物分数和变异量条件，以及进口热流量和速度进口。

!! 如果你在 PDF 里面定义燃料为进口预混组分，那么你应该设定 set $\overline{f}=1$ 和 $c=0$。如果第定义的是纯燃料，那么你必须设定正确的化学恰当比($0<\overline{f}<1$)，和进口处的 $c=0$。

6、初始化进展变量

Solve →Initialize →Patch...

详见 15.3.6 节。

7、求解物理问题并执行后处理

参见 14.3.3 节，详见关于设定求解参数的指导。（这些指导是为非预混燃烧计算的，但是也相应适合于部分预混燃烧）。

16.3.2 在 prePDF 里改变未燃物组分的特性多项式

对于未燃物，prePDF 计算温度、密度、热容量、热扩散作为平均组分百分数的函数，$\overline{f}$ （公式

16.2-3）和层流火焰速度作为 $\bar{f}$ 的分段多项式函数。

未燃物温度，密度，热容，热扩散是通过 CHEMKIN 数据库［125］里的热动力和输运特性计算的。

由于它们都是平滑的和 $\bar{f}$ 的缓慢变化的函数，所以多项式拟合的处理通常非常精确。

但是，就像在 16.2 节里说的，层流火焰速度取决于化学动力学的细节和分子输运特性，不是直接在 prePDF 里计算得来。相反，详细模拟得到的火焰速度，做了曲线拟合。这些拟合只局限于这些燃料 H_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6, 和 C_3H_8，空气为氧化剂，贫油极限恰当比为 1，未燃物温度从 298～ 800k，压力从 1～40bar。如果拟的参数调在这些范围外，prePDF 将会在你计算查询表时警告你。在这种情况下，必须在部分预混模型特性面板（图 16.3.1）里改变分段线性点的的取值，然后再保存 PDF 文件。

Display →Partially Premixed Properties...

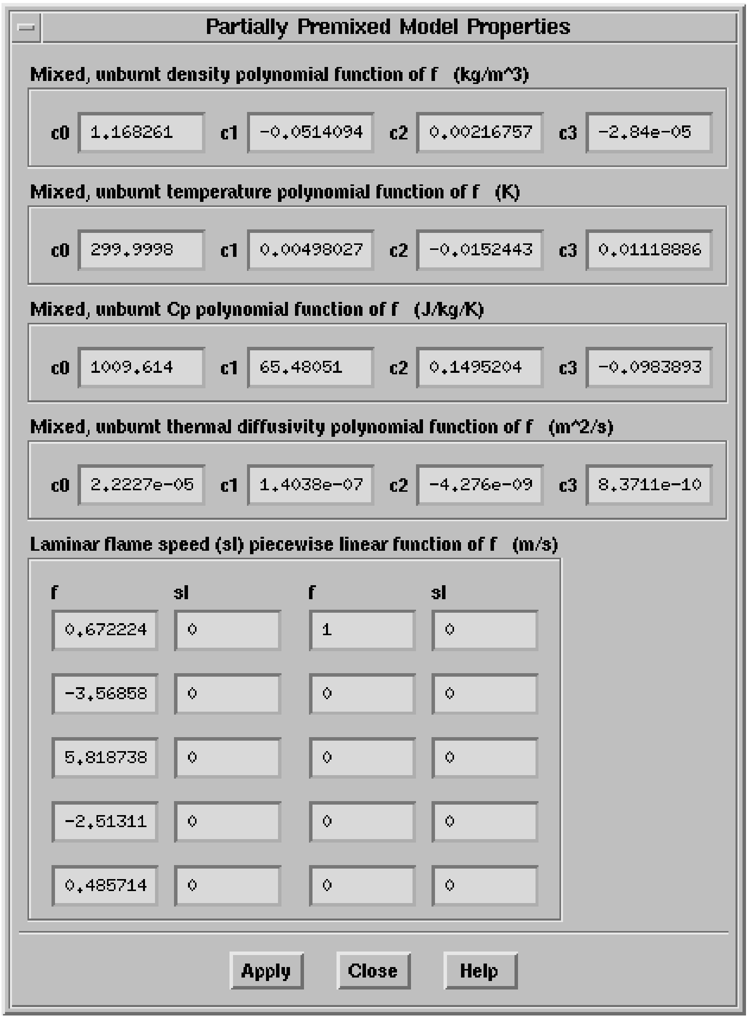


图 16.3.1：prePDF 里的部分预混模型特性面板

对每一个 $\bar{f}$ 的多项式函数（密度，温度，比热和热扩散），你可以指定 c0、c1、c2 和 c3 的值（公式 16.2-3 里的多项式系数）。

也可以对 10 个不同点指定分段线性混合物百分数（f）和相应的层流火焰速度（sl）。第一个指定的点是下限，最后一点是上限。在上下限范围以外，层流火焰速度是常数并等于极限值。

同时注意，你可以为层流火焰速度选择用一个用户自定义函数，这时分段线性拟合就是无关的了。

第 17 章 污染物形成模型

这章讨论 FLUENT 中提供的污染物形成模型。

本章在分为下面两部分中讨论。

17．1：NO_x的形成

17．2：烟灰的形成

17．1 NO_x的形成

下面几部分介绍了 NO_x的预测基础和关于用这种解法器的 NO_x模型的使用方法。

17．1．1：概况和限制

17．1．2：NO_x输运的控制方程

17．1．3：热力型 NO_x的形成

17．1．4：快速型 NO_x的形成

17．1．5：燃料型 NO_x的形成

17．1．6：回燃对 NO_x形成的影响

17．1．7：湍流中 NO_x的形成

17．1．8：NO_x模型的使用

17．1．1 概况和限制

NO_x排放主要是一氧化氮（NO）。其次是二氧化氮（NO_2）和一氧化二氮（N_2O）。NO_x会导致光化学雾，酸雨，臭氧损耗。因此，NO_x是一种污染物。FLUENT 中的 NO_x模型提供了一种理解 NO_x产生源和帮助设计 NO_x控制方法的工具。

FLUENT 中 NO_x的模拟

FLUENT 中 NO_x模型能够模拟热力型、快速型、燃料型以及由于燃烧系统里回燃导致的 NO_x的消耗。其采用燃料能源部、英国 Leeds 大学和公开文献中发展的速率模型。

为了预测 NO_x的排放，FLUENT 解决了 NO 浓度的输运方程，对于燃料 NO_x源，FLUENT 解决了一个中间产物（HCN 或 NH_3）的输运方程。NO_x的输运方程通过给定的流场和燃烧结果来解。换句话说，NO_x的预测是燃烧模拟的后处理过程。因此准确的燃烧模拟结果是 NO_x预测的前提。比如，当温度达到 2200K 后，温度每升高 90K，热力型 NO_x产物就会增翻倍。所以必须提供给燃烧模型准确的热物理参数和边界条件。必须采用湍流、化学、辐射和其他子模型。照实说,仅可以得到与输入数据和选择的物理模型一样精度的结果。在大多数情况下，NO_x的变化趋势能够准确的被预测，但是 NO_x的量不能精确的预测。准确的预测 NO_x参量的变化的趋势可以减少实验室试验的次数，方便更多的设计变化的研究，缩短设计周期，减少产品开发的费用。这就是 FLUENT 中 NO_x模型的真正功能，实际上也是 CFD 的一般功能。

火焰中 NO_x的形成

在层流火焰中，在湍流火焰的分子级别中 NO_x的形成可以分为四个不同的化学动能过程：热力型 NO_x的形成、快速型 NO_x的形成、燃料型 NO_x的形成、回燃。热力型 NO_x是通过氧化燃烧空气中的的氮气而形成的。快速 NO_x是通过在火焰前锋面的快速反应形成的。而燃料型 NO_x是通过氧化燃料中的氮而形成的。回燃机制通过 NO 和碳氢化合物的反应而减少了总的 NO_x的形成。FLUENT 中的 NO_x模型能够模拟所有这四个过程。

NO_x模拟的限制

你必须用分离解法器。而用耦合解法器时，NO_x则不可用。

NO_x模型不能和预混燃烧模型联合使用。

17.1.2NO_x输运的控制方程

FlUENT 解决 NO 组份的质量输运方程，同时考虑了 NO 及相关组份的对流、扩散、生成和消耗。由于来源于质量守恒的基本原则，这种方法是完全通用的。NO_x机制中的滞留时间的影响，拉各朗日坐标系统的概念包含在用欧拉坐标系统写的控制方程的对流项中。对于热力型和快速型 NO_x机制，仅需要 NO_x组份的输运方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\mathrm{NO}}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\mathrm{NO}}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{\mathrm{NO}}) + S_{\mathrm{NO}} \quad (17.1\text{-}1)$$

燃料型 NO_x机制在 17.1.5 中进行了详细介绍。跟踪含氮的中间产物组份是很重要的。FlUENT 除了 NO_x组份，还解决了 HCN 或 NH_3组份的输运方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\mathrm{HCN}}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\mathrm{HCN}}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} Y_{\mathrm{HCN}}) + S_{\mathrm{HCN}} \quad (17.1\text{-}2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\mathrm{NH_3}}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\mathrm{NH_3}}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} Y_{\mathrm{NH_3}}) + S_{\mathrm{NH_3}} \quad (17.1\text{-}3)$$

其中 Y_{HCN},Y_{NH3}和 Y_{NO}是气相的 HCN，NH_3，NO 的质量分数。对于不同的 NO_x机理，随后要决定源项 S_{HCN}、S_{NH3}和 S_{NO}。

17.1.3 热力型 NO_x的形成

热力型 NO_x的形成是由一组被称为广义的 Zeldovich 机理的高度依赖于温度的化学反应决定的。从氮分子形成的热力型 NOx 的主要反应如下：

$$\mathrm{O} + \mathrm{N_2} \underset{}{\overset{k_{+1}}{\rightleftharpoons}} \mathrm{N} + \mathrm{NO} \quad (17.1\text{-}4)$$

$$\mathrm{N} + \mathrm{O_2} \underset{}{\overset{k_{+2}}{\rightleftharpoons}} \mathrm{O} + \mathrm{NO} \quad (17.1\text{-}5)$$

第三个反应，特别在近当量条件和富油条件下要考虑这个反应。

$$\mathrm{N} + \mathrm{OH} \underset{}{\overset{k_{+3}}{\rightleftharpoons}} \mathrm{H} + \mathrm{NO} \quad (17.1\text{-}6)$$

热力型 NOx 反应速率

这些反应的速率常数已经在大量的实验研究中测得【21、70、162】，从这些研究中得到数据已经通过了 Baulch 等人【11】，Hanson 和 Salimian【88】的精密评估。在 NOx 模型中用到的反应 17.1-4－17.1-6 的速率系数表达式如下。这些是在 Hanson 和 Salimian【88】

的评估基础上选择的。

$k_1=1.8\times10^8e^{-38370/T}$ $m^3/gmol\text{-}s$ （17.1-7）

$k_{-1}=3.8\times10^7e^{-425/T}$ $m^3/gmol\text{-}s$ （17.1-8）

$k_2=1.8\times10^4Te^{-4680/T}$ $m^3/gmol\text{-}s$ （17.1-9）

$k_{-2}=3.8\times10^3Te^{-20820/T}$ $m^3/gmol\text{-}s$ （17.1-10）

$k_3=7.1\times10^7e^{-450/T}$ $m^3/gmol\text{-}s$ （17.1-11）

$k_{-3}=1.7\times10^8e^{-24560/T}$ $m^3/gmol\text{-}s$ （17.1-12）

在上面的表达式中，k_1，k_2和 k_3分别是正向反应 17.1-4－17.1-6 速率常数，k_{-1}，k_{-2}，k_{-3}是相应的逆反应的速率常数。

通过反应 17.1-4－17.1-6 的 NO_x 形成的净速率如下：

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt}=k_1[\mathrm{O}][\mathrm{N_2}]+k_2[\mathrm{N}][\mathrm{O_2}]+k_3[\mathrm{N}][\mathrm{OH}]-k_{-1}[\mathrm{NO}][\mathrm{N}]-k_{-2}[\mathrm{NO}][\mathrm{O}]-k_{-3}[\mathrm{NO}][\mathrm{H}]$$

（17.1-13）

其中所有的浓度的单位是 $gmol/m^3$

为了计算 NO 和 N 的形成速率，需要 O，H，OH 的浓度。

[N]准稳定假设

因为固定氮需要打破很强的 N_2的三倍腱（分裂能为 941kJ/gmol），所以 NO_x的形成速率仅在高温（大于 1800K）的情况下才变得重要。这个影响由反应 17.1-4 高活化能表现。其使这步广义 Zeldovich 机理受速率限制。然而氧化 N 原子的活化能很小，当有足够的氧气，比如在贫油火焰中，自由 N 原子消耗的速率等于其形成的速率，因此能够建立一个准稳定态。这个假设对于大多数燃烧情况下（除了富油燃烧情况）都是有效的。因此 NO 的形成速率是：

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt}=2k_1[\mathrm{O}][\mathrm{N_2}]\frac{\left(1-\frac{k_{-1}k_{-2}[\mathrm{NO}]^2}{k_1[\mathrm{N_2}]k_2[\mathrm{O_2}]}\right)}{\left(1+\frac{k_{-1}[\mathrm{NO}]}{k_2[\mathrm{O_2}]+k_3[\mathrm{OH}]}\right)}\quad(\mathrm{gmol/m^3\text{-}s})$$

（17.1-14）

热力型 NO_x对温度的敏感度

从等式 17.1-14 可以很明显的看出，随着氧浓度的增加，NO 的形成速率也跟着增加。也可以很明显的看出热力型 NO 的形成很大程度上依赖于温度而不是燃料的种类。实际上，在如等式 17.1-7 中所描述的有限速率的基础上，当温度高于 2200K 时，温度每升高 90K 热力型 NO_x形成速率就翻一倍。

NO_x和火焰的计算解耦

为了解等式 17.1-14，除了稳定组份（比如 O_2，N_2）的浓度外，还需要知道 O 原子和自由基 OH 的浓度。根据 Zeldovich 的建议，通过假设温度，稳定组份、O 原子和 OH 基的平衡值，热力型 NO_x形成的机理可以从主要的燃烧过程中解耦出来。然而据观察，基的浓度，特别是 O 原子，要比平衡的时候大的多。局部平衡 O 原子对 NO_x形成速率的影响已经在层流甲烷－空气燃烧中研究过【159】。研究结果表明，当假设平衡 O 原子浓度时，NOx 的浓度会被低预测 28％。

确定 O 基浓度

目前几乎没有对工业湍流火焰中的基的浓度的详细研究，但是工作【56】已经论述了湍

流扩散火焰中这种现象的存在。目前，对在湍流扩散火焰中局部平衡对 NO_x 形成速率的影响还没有确定的结论。Peter 和 Donnerhack【178】认为局部平衡基会增加最多 25%的热力型 NO_x，而流体动力学对 NO_x 形成速率的影响是主要的。Bilger 等人【18】认为在湍流扩散火焰中，O 原子的射流对 NOx 的形成的影响很大。

为了克服可能的不准确，将广义 Zeldovich 机理和一个详细的碳氢燃烧机理耦合，这种碳氢燃烧机理包括很多反应、组份和步骤。这种方法最初是用来研究的【156】。然而，长的计算机过程使这种方法经济上不据吸引力，也使其用于湍流很困难。

鉴于上面的讨论，要确定 O 基的浓度，FLUENT 可以使用以下三种方法之一，及平衡方法、局部平衡方法，和预测浓度方法。

方法一：平衡方法

热力型 NO_x 的形成速率的动力学要比主要碳氢化合物的氧化速率慢得多，所以大多数热力型 NO_x 是在燃烧完全后形成的。因此，热力型 NO_x 得形成过程可以从主燃烧反应机制中分离出来而且 NO_x 得形成速率能够通过假定燃烧反应平衡来计算。通过使用这种方法，计算热力型 NO_x 的形成速率大大的简化了。可以通过基在高温火焰中的过冲量的重要性减少来证明假定平衡的假设的合理性。【55】。根据 Westenberg【265】，O 原子浓度的平衡能够通过下面的表达式来获得：

$$[\mathrm{O}] = k_p [\mathrm{O_2}]^{1/2} \tag{17.1-15}$$

将 k_p 带入，该表达式可写为：

$$[\mathrm{O}] = 3.97 \times 10^5 T^{-1/2} [\mathrm{O_2}]^{1/2} e^{-31090/T} \qquad \mathrm{gmol/m^3} \tag{17.1-16}$$

其中 T 的单位为 Kelvin。

方法二：局部平衡方法

该方法是方法一的一种改进方法，其在 O2 的分列再结合的过程中考虑了第三体反应：

$$\mathrm{O_2 + M \rightleftharpoons O + O + M} \tag{17.1-17}$$

此时，等式 17.1-16 可由下式代替：

$$[\mathrm{O}] = 36.64 T^{1/2} [\mathrm{O_2}]^{1/2} e^{-27123/T} \qquad \mathrm{gmol/m^3} \tag{17.1-18}$$

其通常导致更高的局部 O 原子浓度。

方法三：预测氧原子方法

当氧原子浓度通过高级化学模型（比如扩散燃烧中的小火焰子模型）较好的预测，【o】可以简单的从当地 O 组份质量分数获得。

确定 OH 基的浓度

FLUENT 可以使用以下三种方法之一来确定，及从热力型 NO_x 计算方法中排除 OH、局部平衡方法，和预测 OH 浓度方法。

方法一：排除 OH 方法

在这种方法中，通过下面的观察，广义的 Zeldovich 机理重的第三个反应（等式 17.1-6）假定为可以忽略：

$$k_2[O_2]_{eq} \gg k_3[OH]_{eq}$$

这个假设再贫油条件下得到了证实而且对大多数情况下式合理的假设。

方法二：局部平衡方法

在这种方法中，广义的 Zeldovich 机理重的第三个反应（等式 17.1-6）中的 OH 浓度为：

$$[OH] = 2.129 \times 10^2 T^{-0.57} e^{-4595/T} [O]^{1/2} [H_2O]^{1/2} \quad \text{gmol/m}^3 \qquad (17.1\text{-}19)$$

方法三：预测 OH 方法

如同预测 O 原子的方法，当 OH 基浓度通过高级化学模型，比如小火焰子模型，较好的预测，[OH]可以直接的从当地 OH 组份质量分数获得。

总结

总的来说，热力型 NO_x 形成速率通过等式 17.1-14 预测。该式中的 O 原子浓度，采用平衡方法时，可以通过等式 17.1-16 计算得到，采用局部平衡方法时，可以通过等式 17.1-18 来计算，采用预测 O 原子方法时，可以用当地 O 组份质量分数。你可以再问题设置时来选择使用那一种方法。在 NO 输运方程中（等式 17.1-1），由于热力型 NO_x 机理，NO 源项可表达为：

$$S_{\text{thermal,NO}} = M_{w,\text{NO}} \frac{d[\text{NO}]}{dt} \qquad (17.1\text{-}20)$$

其中 $M_{w,NO}$ 是 NO 的分子量，而 d[NO]/dt 可以通过等式 17.1-14 计算得到。

17．1．4 快速型 NO_x 的形成

大家都知道在燃烧碳氢化合物燃料时，NO_x 的形成速度会超过直接氮分子氧化所产生 NO_x 的速度（如热力型 NO_x）

快速型 NO_x 产生的地点和时刻

第二种导致 NO_x 形成的机理是由 Fenimore 首先确定的【63】，叫着“快速型 NO_x”，有很好的证据表明在一些燃烧环境中能够形成大量的快速型 NO_x，比如在低温、富油且停滞时间很短的条件下。面燃烧器，分段燃烧系统以及燃气轮机能够创造这种条件【6】。

目前，快速型 NO_x 占固定燃烧器中总的 NO_x 的比例很小。然而，当通过采用新的方法（火炉设计或炉子尺寸修改）使 NO_x 的排放降到一个非常低的的水平时，快速型 NO_x 的更为显得重要。

快速型 NOx 机制

快速型 NOx 在富燃火焰中最为普遍。实际的形成过程包括一系列复杂的反应和许多可能的中间组份。这个形成过程如下反应式所示：

$$\text{CH} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{N} \qquad (17.1\text{-}21)$$

$$\text{N} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{O} \qquad (17.1\text{-}22)$$

$$\mathrm{HCN + OH \rightleftharpoons CN + H_2O}$$

（17.1-23）

$$\mathrm{CN + O_2 \rightleftharpoons NO + CO}$$

（17.1-24）

许多来源于燃料分裂的组份被认为是在碳氢化合物火焰中快速型 NO_x 的源项（例如 CH，CH_2，C，C_2H），但主要由 CH（等式 17.1-21）和 CH_2，通过：

$$\mathrm{CH_2 + N_2 \rightleftharpoons HCN + NH} \quad (17.1\text{-}25)$$

这些反应的产物能够导致胺和氰化合物的形成，而这些化合物随后会通过与发生在氧化燃料氮相似的反应中反应形成 NO，如：

$$\mathrm{HCN + N \rightleftharpoons N_2 + ...} \quad (17.1\text{-}26)$$

快速 NO_x 形成的因素

快速型 NO_x 与单位体积里碳原子的数量成比例而与碳氢化合物本身无关。形成 HCN 的数量随着碳氢基的浓度增加而增加，而碳氢基的浓度随着当量率的增加而增加。当当量率增加时，快速型 NO_x 产量先增加，随后通过一个高峰值，最终由于氧的不足而降低。

主要反应

反应 17.1-21 是最重要的。在最近的研究【201】中，比较 NO_x 峰值位置的概率密度分布与已获得的 CH 峰值表明它们有很大的联系，表明在火焰基部的 NO_x 主要是通过 CH 反应而形成的。假定反应 17.1-21 控制快速型 NO_x 的形成速率，

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = k_0[\mathrm{CH}][\mathrm{N_2}]$$

（17.1-27）

模拟策略

然而上面反应的速率还不确定。从反应 17.1-21－17.1-25 看，火焰中快速型 NO_x 的预测需要结合 NO_x 动力学和实际碳氢化合物燃烧机制。如前所提到的，碳氢化合物燃烧机制包括许多步，其极其复杂而且所需计算量很大。在目前的 NO_x 模型当中，采用了由 De Soete【223】提出的通用动力学参数。De Soete 把总的 NO_x 形成速率的实验值与通过对 NO_x 和 N_2 形成的全部经验反应速率的数值积分得到的形成速率进行了比较。他提出所有快速形成速率能够通过下式来预测：

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = (\text{overall prompt NOx formation rate}) - (\text{overall prompt } \mathrm{N_2} \text{ formation rate})$$

（17.1-28）

在火焰的早期阶段，快速型 NO_x 是在富油条件下形成的，氧浓度很高而 N 基几乎全部形成了 NO_x 而不是氮气。因此，快速型 NO_x 形成速率可近似等于全部快速型 NO_x 的形成速率：

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = k_{pr}[\mathrm{O_2}]^a[\mathrm{N_2}][\mathrm{FUEL}]e^{-E_a/RT}$$

（17.1-29）

对于 C_2H_2（乙烯）－空气火焰，

k_{er}＝1.2×10^7（RT/p）$^{a+1}$

E_a=60Kcal/gmol

其中 a 是氧气反应指数，R 是通用气体常数，p 是压强（都用 SI 单位）。考虑到氮气和燃料浓度，快速型 NO_x 形成速率是最高级的，而氧气反应指数 a 要依赖于实验条件。

大多数碳氢燃料的快速型 NOx 形成速率

对于不同的混合浓度和燃料类型，等式 17.1-29 与 Backmier 等人【4】的实验数据有矛盾，预测结果表明在富油条件和燃烧高碳氢燃料时，模型预测得很不准。为了在所有条件下减少错误并充分的预测快速型 NO_x，通过使用已有的实验数据对 De Soete 模型进行了修改。提出了一个修正因子 f，其综合了燃料的种类，例如碳原子数和对于气态脂肪族碳氢化合物的空气燃料比，的影响。等式 17.1-29 变为：

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = f k'_{pr} [\mathrm{O_2}]^a [\mathrm{N_2}][\mathrm{FUEL}] e^{-E'_a/RT} \quad (17.1\text{-}30)$$

因此由于快速型 NO_x 机理的源项是：

$$S_{\mathrm{prompt,NO}} = M_{w,\mathrm{NO}} \frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} \quad (17.1\text{-}31)$$

在上式中：

$$f = 4.75 + 0.0819\ n - 23.2\phi + 32\phi^2 - 12.2\phi^3 \quad (17.1\text{-}32)$$

对于碳氢燃料，n 是每个分子中碳原子数，φ 是当量率。修正因子是对实验数据的曲线拟合，其对脂肪族烷烃燃料（C_nH_{2n+2}）有效，对于当量率在 0.6—1.6 内也有效。对于值在这个范围之外的，应该采取适当的限制。k_{pr}' 和 E_a' 的值可根据参考书【58】选择。

这里当量率的概念是指火焰的全局当量率，而不是指在流场中随空间变化的值。有多级燃烧器的复杂几何形状会给确定 φ 带来了难度。然而由于快速型 NO_x 占总的 NO_x 排放比例通常很小，结果一般不会偏差很大。

氧气反应指数

氧气反映指数依赖于火焰条件。根据 De Soete【223】，氧气反应指数只与火焰中氧的摩尔分数有关：

$$a = \begin{cases} 1.0, & X_{\mathrm{O_2}} \le 4.1 \times 10^{-3} \\ -3.95 - 0.9 \ln X_{\mathrm{O_2}}, & 4.1 \times 10^{-3} \le X_{\mathrm{O_2}} \le 1.11 \times 10^{-2} \\ -0.35 - 0.1 \ln X_{\mathrm{O_2}}, & 1.11 \times 10^{-2} < X_{\mathrm{O_2}} < 0.03 \\ 0, & X_{\mathrm{O_2}} \ge 0.03 \end{cases} \quad (17.1\text{-}33)$$

17.1.5 燃料型 NO_x 的形成

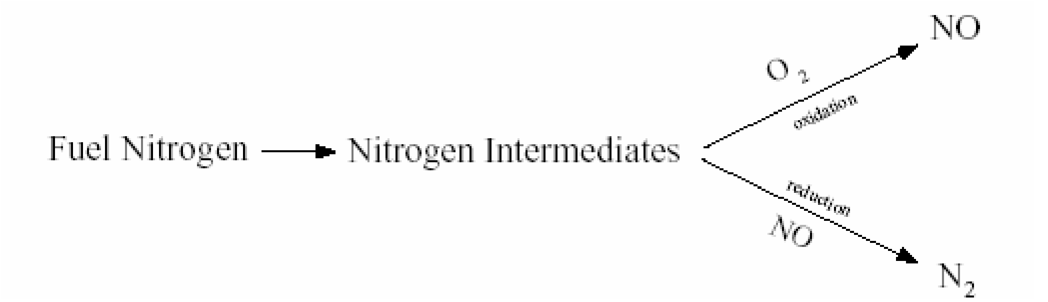
燃料中的 N_2

众所周知，含氮的有机化合物，无论存于液态还是固态化石燃料中，在燃烧过程中都将增加 NO_x 的形成。对于残余的燃油与煤燃料中的这些氮是氮氧化物排放的一个特别重要的来源，从重量上来讲，它含有 0.3-2%的氮。研究表明，在重油中，大多数氮以杂环化合物的形式存在，它被认为与煤中氮的成分相类似【107】。我们相信氮杂苯、氮杂萘及胺型的杂

环化合物环状结构是很重要的。

反应途径

燃料中氮转化为 NO_x 的程度取决于实际的燃烧特性及含氮化合物的初始浓度。当燃料液滴或粒子液化被加热时，燃料中含氮化合物变为气态。随着这些化合物（如苯胺、氮杂苯、氮杂茂等）在反应区域中的热分解，像 HCN, NH_3, N, CN, 和 NH 这些基能够形成或转化为 NO_x。前面的这些自由基（也就是二级中间氮化物）将有可能发生两种反应。这些化学反应过程已经为一些详细的调查研究所描述【157】。虽然人们对燃料型 NO_x 形成和消失的途径并没有完全知晓，但不同的研究者对下面的简单模型基本已达成共识：



近来的研究【94】表明如果燃料氮以芬芳族或环状化合物形式存在时，氢氰化物似乎是首要产物。然而，当燃料氮以脂肪胺形式存在时，氨是燃料氮转化的首要产物。

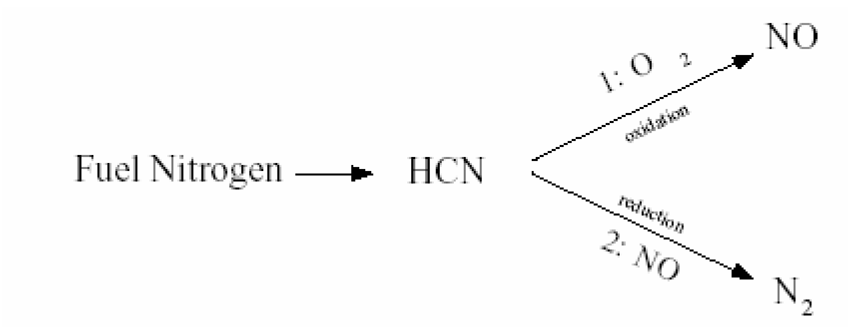
在 FLUENT 的 NO_x 模型中，NO_x 的排放源按照气态、液态燃料及煤这三种燃料分别进行考虑。含氮的中间化合物被分为 HCN 与 NH_3 两组。方程式（17.1-1、17.1-2 和 17.1-3）与其相对应。它们用符号表示为：S_{HCN}、S_{NH3}，S_{NO} 可根据不同的燃料类型来定义。对于 S_{NO} 项，以下的讨论仅指燃料型 NO_x 源。而关于热量和即时过程的内容已在前几章讨论过。

来自气态和液态燃料的燃料型 NO_x

对于气态和液态燃料，燃料型 NO_x 的形成过程虽然基于不同的物理过程，但它们的化学反应方式是一样的。

来自中间产物氢氰化合物**(HCN)**的燃料 NO_x

当 HCN 被用作中间组份时，



输运方程中的源项可写作：

$$S_{\rm HCN} = S_{\rm pl,HCN} + S_{\rm HCN-1} + S_{\rm HCN-2} \qquad (17.1\text{-}34)$$

$$S_{\rm NO} = S_{\rm NO-1} + S_{\rm NO-2} \qquad (17.1\text{-}35)$$

在气态燃料中的 **HCN** 产物

HCN 产物的产生速度与燃料的燃烧速度相当：

$$S_{\mathrm{pl,HCN}} = \frac{\mathcal{R}_{\mathrm{cf}}\ Y_{\mathrm{N,fuel}}\ M_{w,\mathrm{HCN}}}{M_{w,\mathrm{N}}} \tag{17.1-36}$$

其中：$S_{pl.HCN}$= HCN 源项(kg/m^3 -s)

R_{cf}=燃料的平均反应速度 (kg/m^3 -s)

$Y_{N,fuel}$=燃料中氮的质量分数

燃料的平均反应速度 R_{cf} 由 Magnussen 燃烧模型进行计算，因此，只有采用一般有限速度模型时，气态燃料 NO_x 的选择才可用。

在液态燃料中的 **HCN** 产物

HCN 产物的产生速度与燃料通过液滴蒸发转化为气态的速度相当

$$S_{\mathrm{pl,HCN}} = \frac{S_{\mathrm{fuel}}\ Y_{\mathrm{N,fuel}}\ M_{w,\mathrm{HCN}}}{M_{w,\mathrm{N}} V} \tag{17.1-37}$$

其中：$S_{pl.HCN}$＝HCN 源项 (kg/m^3-s)

Sfuel＝燃料通过液滴蒸发转化为气态的速率 (kg/s)

YN,fuel＝燃料中氮的质量分数

V＝单元体积 (m^3)

HCN 的消耗

对于气态和液态燃料，以上反应（1）、反应（2）过程中的 HCN 消耗率是相同的，De Soete【223】给出了其数学式：

$$\mathcal{R}_1 = A_1\ X_{\mathrm{HCN}}\ X_{\mathrm{O_2}}^{a}\ e^{-E_1/RT} \tag{17.1-38}$$

$$\mathcal{R}_2 = A_2\ X_{\mathrm{HCN}}\ X_{\mathrm{NO}}\ e^{-E_2/RT} \tag{17.1-39}$$

其中：R_1，R_2＝HCN 的转化速率 (s^{-1})

T＝即时温度（K）

X=摩尔分数

A_1＝1.0×10^{10}s^{-1}（FLUENT6.0 中＝3.5×10^{10}s^{-1}）

A_2＝3.0×10^{12}s^{-1}

E1＝67 kcal/gmol

E2＝60 kcal/gmol

氧气反应系数，a,可由 17.1-33 式计算。

由于摩尔分数与质量分数通过 $M_{w,j}$ 和 $M_{w,m}$ 的分子量相联系：

$$X_i = Y_i \frac{M_{w,m}}{M_{w,i}} = \frac{Y_i}{M_{w,i}} \left(\frac{\rho RT}{p}\right) \tag{17.1-40}$$

输运方程中的 HCN 源项

在方程 17.1-34 中的 HCN 质量消耗率可通过下式计算：

$$S_{\mathrm{HCN-1}} = -\mathcal{R}_1 \frac{M_{w,\mathrm{HCN}}\, p}{R\overline{T}} \tag{17.1-41}$$

$$S_{\mathrm{HCN-2}} = -\mathcal{R}_2 \frac{M_{w,\mathrm{HCN}}\, p}{R\overline{T}} \tag{17.1-42}$$

其中：S_{HCN-1}、S_{HCN-2}＝分别在反应 1、反应 2 中的 HCN 消耗率 (kg/m^3-s)

p＝压力 (Pa)

$\overline{T}$ ＝平均温度 (K)

R＝通用气体常数

输运方程中的 NO_x 源项

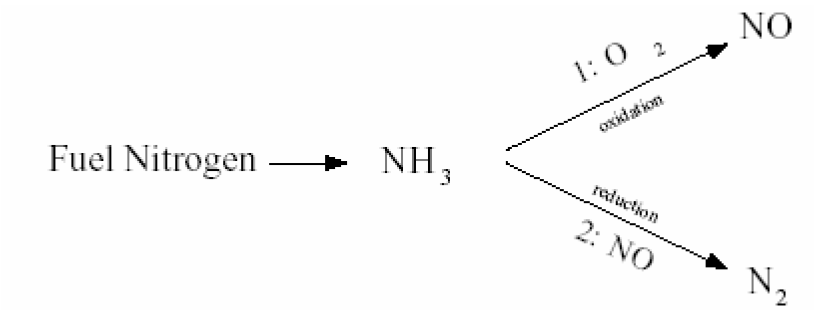
NO_x 在反应 1 中产生，在反应 2 中消失。对于气体和液体燃料，方程 17.1-35 中得源项是相同的，可由下式估算：

$$S_{\mathrm{NO-1}} = -S_{\mathrm{HCN-1}} \frac{M_{w,\mathrm{NO}}}{M_{w,\mathrm{HCN}}} = \mathcal{R}_1 \frac{M_{w,\mathrm{NO}}\, p}{R\overline{T}} \tag{17.1-43}$$

$$S_{\mathrm{NO-2}} = S_{\mathrm{HCN-2}} \frac{M_{w,\mathrm{NO}}}{M_{w,\mathrm{HCN}}} = -\mathcal{R}_2 \frac{M_{w,\mathrm{NO}}\, p}{R\overline{T}} \tag{17.1-44}$$

来自中间氨化物（NH_3）的燃料型 NO_x

当用 NH_3 作中间组份时：



输运方程中的源项可写作：

$$S_{\mathrm{NH_3}} = S_{\mathrm{pl,NH_3}} + S_{\mathrm{NH_3-1}} + S_{\mathrm{NH_3-2}} \tag{17.1-45}$$

$$S_{\mathrm{NO}} = S_{\mathrm{NO-1}} + S_{\mathrm{NO-2}} \tag{17.1-46}$$

在气态燃料中的 NH_3 产物

NH_3 产物的产生速度与燃料的燃烧速度相当：

$$S_{\mathrm{pl,NH_3}} = \frac{\mathcal{R}_{\mathrm{cf}}\, Y_{\mathrm{N,fuel}}\, M_{w,\mathrm{NH_3}}}{M_{w,\mathrm{N}}} \tag{17.1-47}$$

其中：$S_{pl,\ NH3}$＝NH3 源项 (kg/m^3-s)

R_{cf}＝燃料的平均限制反应速度 (kg/m^3-s)

$Y_{N,fuel}$＝燃料中氮的质量分数

燃料的平均限制反应速度 R_{cf} 由 Magnussen 燃烧模型进行计算，因此，只有采用一般有限速度模型时，气态燃料 NO_x 的选择才可用。

在液态燃料中的 **NH_3** 产物

NH_3 产物的产生速度与燃料通过液滴蒸发转化为气态的速度相当

$$S_{\rm pl,NH_3} = \frac{S_{\rm fuel}\ Y_{\rm N,fuel}\ M_{w,\rm NH_3}}{M_{w,\rm N} V} \tag{17.1-48}$$

其中：$S_{pl,NH3}$＝NH_3 源项 (kg/m^3-s)

S_{fuel}＝燃料通过液滴蒸发转化为气态的速度 (kg/s)

$Y_{N,fuel}$＝燃料中氮的质量分数

V＝单元体积 (m^3)

NH_3 的消耗

对于气态和液态燃料，以上反应（1）、反应（2）过程中的 NH_3 消耗率是相同的，De Soete [223]给出了其数学式：

$$\mathcal{R}_1 = A_1\ X_{\rm NH_3}\ X_{\rm O_2}^a\ e^{-E_1/RT} \tag{17.1-49}$$

$$\mathcal{R}_2 = A_2\ X_{\rm NH_3}\ X_{\rm NO}\ e^{-E_2/RT} \tag{17.1-50}$$

其中：R_1、R_2＝NH_3 的转化速率 (s^{-1})

T＝即时温度（K）

X＝摩尔分数

A_1＝$4.0\times10^6 s^{-1}$

A_2＝$1.8\times10^6 s^{-1}$

E_1＝32kcal/gmol

E_2＝27kcal/gmol

氧气反应系数 a, 可由 17.1-33 式计算。

由于摩尔分数与质量分数通过组份 M_i 和 M_m 的分子量相联系：

$$X_i = Y_i \frac{M_{w,m}}{M_{w,i}} = \frac{Y_i}{M_{w,i}} \left(\frac{\rho RT}{p}\right) \tag{17.1-51}$$

输运方程中的 NH_3 源项

在方程 17.1-34 中的 NH_3 质量消耗率可通过下式计算：

$$S_{\rm NH_3-1} = -\mathcal{R}_1 \frac{M_{w,\rm NH_3}\ p}{RT} \tag{17.1-52}$$

$$S_{\rm NH_3-2} = -\mathcal{R}_2 \frac{M_{w,\rm NH_3}\ p}{RT} \tag{17.1-53}$$

其中：S_{NH3-1}、S_{NH3-2}＝分别在反应 1、反应 2 中的 HCN 消耗率 (kg/m^3-s)

p＝压力 (Pa)

$\overline{T}$ ＝平均温度 (K)

R＝通用气体常数

输运方程中的 NO_x 源项

NO_x 在反应 1 中产生，在反应 2 中消失。对于气体和液体燃料，方程 17.1-46 中得源项是相同的，可由下式估算：

$$S_{\rm NO-1} = -S_{\rm NH_3-1}\frac{M_{w,\rm NO}}{M_{w,\rm NH_3}} = \mathcal{R}_1\frac{M_{w,\rm NO}\ p}{R\overline{T}} \quad (17.1\text{-}54)$$

$$S_{\rm NO-2} = S_{\rm NH_3-2}\frac{M_{w,\rm NO}}{M_{w,\rm NH_3}} = -\mathcal{R}_2\frac{M_{w,\rm NO}\ p}{R\overline{T}} \quad (17.1\text{-}55)$$

来自煤炭的燃料型 NO_x

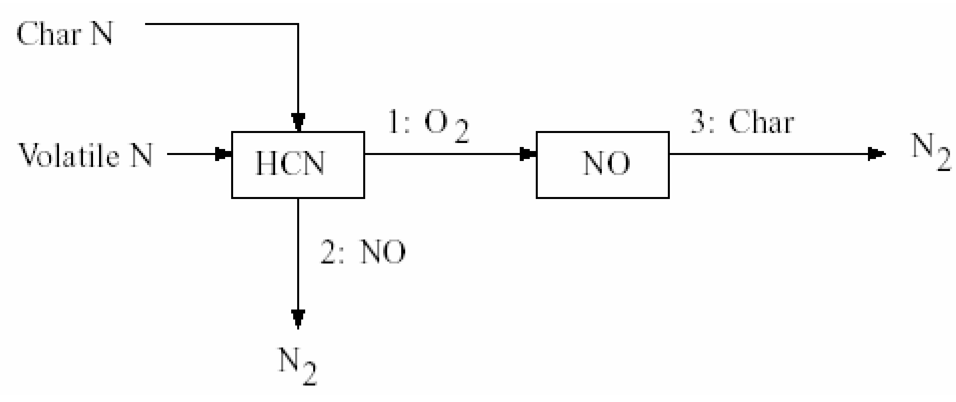
炭和挥发物中的氮

就煤而言，假定燃料氮分布在挥发物和炭之间。由于没有理由假定氮在挥发物和炭之间是均匀分布的，我们要对氮在挥发物和炭之间的分布数分别说明。

当 HCN 作为中间组分时，对于煤碳，包括两个燃料型 NO_x 机制变化。当 NH_3 作为中间组份时，对于煤碳，包括两个燃料型 NO_x 机制变化，和通过 HCN 从煤炭生成 NO_x 的计算十分类似。假定燃料氮分布在挥发物和炭之间。

煤炭燃料型 NO_x 方案 A【222】

第一种 HCN 机制假定炭中的氮变成 HCN，然后 HCN 部分转变成 NO[222]，其反应路径如下图所示：



在第一方案里，炭中的所有的氮转化为 HCN，因此，

$$S_{\rm char,HCN} = \frac{S_c Y_{\rm N,char} M_{w,\rm HCN}}{M_{w,\rm N} V} \quad (17.1.56)$$

$$S_{\rm char,NO} = 0 \quad (17.1.57)$$

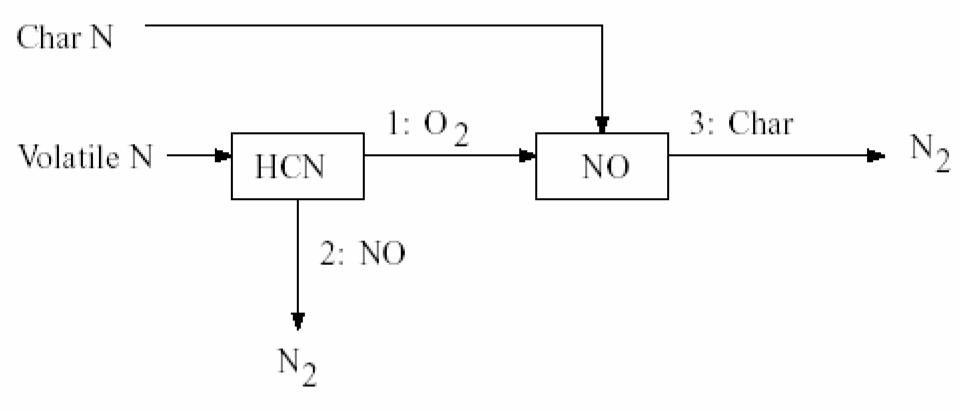
式中，S_c＝煤炭燃尽率（kg/s）；

$Y_{N,char}$＝焦碳中氮的质量分数；

V＝单元体积（m^3）

煤炭燃料型 NO_x 方案 B【144】

第二方案的 HCN 机制假定所有的炭中氮全部直接转化为 NO[144]，反应路径如下图所示：



依据 Lockwood 【144】的方法，第二种 HCN 机制假设炭中的氮（char nitrogen）全都直接转化为 NO，过程如下：

$$S_{\text{char,HCN}} = 0 \qquad (17.1.58)$$

$$S_{\text{char,NO}} = \frac{S_c Y_{\text{N,char}} M_{w,\text{NO}}}{M_{w,\text{N}} V} \qquad (17.1.59)$$

采用哪种 HCN 方案？

第二种 HCN 机制往往比第一种释放更多的 NO_x，然而，通常情况下很难说哪一种方案更优。输运方程的源项如下：

$$S_{\text{HCN}} = S_{\text{pvc,HCN}} + S_{\text{HCN}-1} + S_{\text{HCN}-2} \qquad (17.1.60)$$

$$S_{\text{NO}} = S_{\text{char,NO}} + S_{\text{NO}-1} + S_{\text{NO}-2} + S_{\text{NO}-3} \qquad (17.1.61)$$

源项由 S_{HCN-1}，S_{HCN-2}，S_{NO-1}，S_{NO-2} 组成，它们以前已经描述过了。因此，只有异类反应源项 S_{NO-3}、炭 NO_x 的源反应物 $S_{char,NO}$ 和 HCN 产物的源项 $S_{pvc,\ HCN}$ 需要考虑。

NO_x 在炭表面还原

参考[134]，在炭表面还原 NO 的异类反应（heterogeneous reaction）模拟如下：

$$\mathcal{R}_3 = A_3 e^{-E_3/RT}\,\overline{p}_{\text{NO}} \qquad (17.1.62)$$

式中，R_3＝NO 的还原率（$gmol/m_{BET}^2$-s）；

$\overline{p}_{NO}$＝NO 的平均局部压强（atm）；

E_3 = 34 kcal/gmol ；

A_3 = 230 $gmol/m_{BET}^2$-s-atm ；

$\overline{T}$ ＝平均温度（K）；

局部压强 $\overline{p}_{NO}$ 利用 Dalton 法则计算：

$$p_{\mathrm{NO}} = X_{\mathrm{NO}}\, p$$

反应 3 中的 NO 消耗率为：

$$S_{\mathrm{NO-3}} = \frac{c_s A_{\mathrm{BET}} M_{w,\mathrm{NO}} \mathcal{R}_3}{1000}$$

式中，A_{BET}＝BET 的表面积（m^2/kg）；

c_s＝粒子浓度（kg/m^3）；

S_{NO-3}＝NO 消耗量（kg/m^3-s）；

BET 表面积

包括炭的异类反应主要是一个吸附过程，其反应率与空隙的表面积成正比。由于 Brunauer, Emmett and Teller 首先指出吸附理论【28】的缘故，空隙面积被称为 BET 表面积。由于纤细的结构，商业吸附剂的 BET 空隙面积一般在每千克 100,000 到 2,000,000 平方米的范围内。煤炭的典型 BET 面积为 25,000 m^2/kg，这是 FLUENT 的默认值。HCN 的全部源项（$S_{pvc,HCN}$）是由挥发物（$S_{vol,HCN}$）和焦炭（$S_{char,HCN}$）的贡献之和：

$$S_{\mathrm{pvc,HCN}} = S_{\mathrm{vol,HCN}} + S_{\mathrm{char,HCN}}$$

来源于挥发物的 HCN

来自挥发物的 HCN 原反应物与挥发物的释放率有关：

$$S_{\mathrm{vol,HCN}} = \frac{S_{\mathrm{vol}}\, Y_{\mathrm{N,vol}} M_{w,\mathrm{HCN}}}{M_{w,\mathrm{N}} V}$$

式中，S_{vol}＝源于气态煤粉颗粒的挥发物源项（kg/s）；

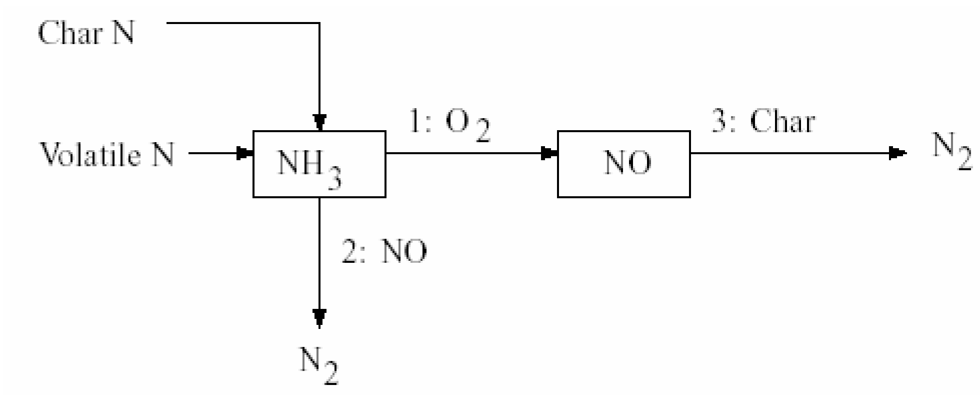
$Y_{N,vol}$＝挥发物中氮的质量分数；

V＝单元体积（m^3）；

与炭固氮（char-bound nitrogen）相关的源项计算取决于燃料型 NO_x 方案的选择。

煤炭燃料氧化氮方案 C【222】

第一种 NH_3 机制假定炭中的氮变成 NH_3，然后 NH_3 部分转变成 NO【222】，其反应路径如下图所示：



这个方案中，所有的炭固氮转化为 NH_3，因此，

$$S_{\mathrm{char,NH_3}} = \frac{S_c Y_{\mathrm{N,char}} M_{w,\mathrm{NH_3}}}{M_{w,\mathrm{N}} V} \tag{17.1.63}$$

$$S_{\mathrm{char,NO}} = 0 \tag{17.1.64}$$

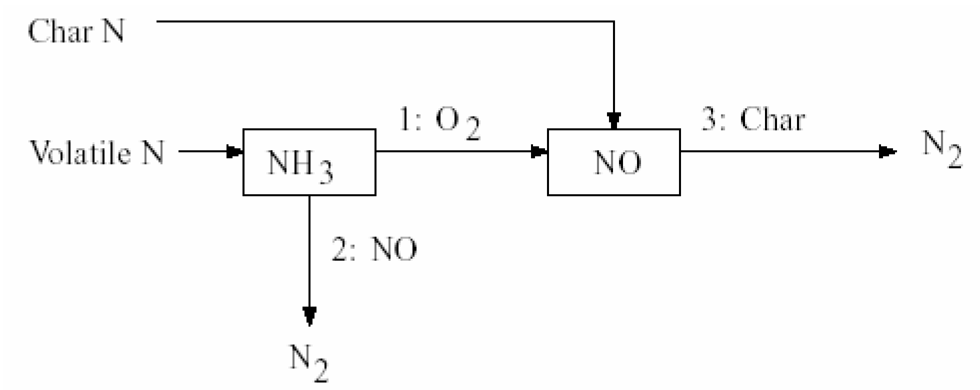
式中，S_c＝炭的燃尽率（char burnout rate）（*kg/s*）；

$Y_{\mathrm{N,char}}$＝炭中氮的质量分数；

V＝单元体积（m^3）；

木炭燃料氧化氮方案 D 【144】

第二种 NH_3 机制假定炭中的氮直接变成 NO【144】，其反应路径如下图所示：



依据 Lockwood [144]的方法，炭氮（char nitrogen）被直接释放成气态的 NO，NO 主要是作为在炭中氮原子氧化中的解吸作用的产物，如果遵循这种途径，就有：

$$S_{\mathrm{char,NH_3}} = 0 \tag{17.1.65}$$

$$S_{\mathrm{char,NO}} = \frac{S_c Y_{\mathrm{N,char}} M_{w,\mathrm{NO}}}{M_{w,\mathrm{N}} V} \tag{17.1.66}$$

选用何种 NH_3 方案？

第二种 NH_3 机制往往比第一种释放更多的 NOx，然而，通常情况下很难说哪一种方案更优。输运方程的源项如下：

$$S_{\mathrm{NH_3}} = S_{\mathrm{pvc,NH_3}} + S_{\mathrm{NH_3-1}} + S_{\mathrm{NH_3-2}}$$ （17.1.67）

$$S_{\mathrm{NO}} = S_{\mathrm{char,NO}} + S_{\mathrm{NO-1}} + S_{\mathrm{NO-2}} + S_{\mathrm{NO-3}}$$ （17.1.68）

源项（Source contributions）S_{NH3-1}，S_{NH3-2}，S_{NO-1}，S_{NO-2}，S_{NO-3}，$S_{char,NO}$ 以前已经描述过了，因此，只有 NH_3 的产生源反应物 $S_{pvc,NH3}$ 需要考虑。

产生 NH_3 的全部源项是挥发物源（$S_{vol,NH3}$）和炭源（$S_{char,NH3}$）两项组成的：

$$S_{\mathrm{pvc,NH_3}} = S_{\mathrm{vol,NH_3}} + S_{\mathrm{char,NH_3}}$$ （17.1.69）

来自挥发物的 NH_3

来自挥发物 NH_3 的源项与挥发物的比率有关：

$$S_{\mathrm{vol,NH_3}} = \frac{S_{\mathrm{vol}}\, Y_{\mathrm{N,vol}} M_{w,\mathrm{NH_3}}}{M_{w,\mathrm{N}} V}$$

式中，S_{vol}＝源于气态煤粉颗粒的挥发物源项（kg/s）；

$Y_{N,vol}$＝挥发物中氮的质量分数；

V＝单元体积（m^3）；

与炭固氮（char-bound nitrogen）相关的源项计算取决于燃料型 NO_x 方案的选择。

17.1.6 回燃型 NO_x

回燃 NO 机制是一种通过 NO 和碳氢化合物反应而导致 NO 减少的方法。通常表示为:

$$\mathrm{CH}_i + \mathrm{NO} \rightarrow \mathrm{HCN} + \mathrm{products}$$ （17.1-70）

对于温度在 1600K~2100K 之间时，FLUENT 模拟下面三个回燃反应：

$$\mathrm{CH} + \mathrm{NO} \xrightarrow{k_1} \mathrm{HCN} + \mathrm{O}$$ （17.1-71）

$$\mathrm{CH_2} + \mathrm{NO} \xrightarrow{k_2} \mathrm{HCN} + \mathrm{OH}$$ （17.1-72）

$$\mathrm{CH_3} + \mathrm{NO} \xrightarrow{k_3} \mathrm{HCN} + \mathrm{H_2O}$$ （17.1-73）

如果温度在这个范围之外时，则不计算 NO 回燃。

这些反应的速率常数取于【23】

$k_1=1\times10^8$ m3/gmol-s （17.1-74）

$k_2=1.4\times10^6 e^{-550/T}$ m3/gmol-s （17.1-75）

$k_3=2\times10^5$ m3/gmol-s （17.1-76）

NO 由于回燃而导致的损耗速率可表示为：

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = -k_1[\mathrm{CH}][\mathrm{NO}] - k_2[\mathrm{CH_2}][\mathrm{NO}] - k_3[\mathrm{CH_3}][\mathrm{NO}]$$ （17.1-77）

NO 输运方程中回燃机制的源项可以通过下式计算：

$$S_{\mathrm{reburning,NO}} = -M_{w,\mathrm{NO}} \frac{d[\mathrm{NO}]}{dt}$$ （17.1-78）

！为了计算由于回燃而导致的 NO 损耗速率，FLUENT 要从燃烧计算结果中获得 CH、CH_2、CH_3 的浓度。因此，在定义组份时应该包括这些组份（或者在非预混燃烧计算中的 prePDF 中定义，或者在 FLUENT 中定义）。

17.1.7 紊流中 NO_x 的形成

在以上几节中描述的 NO_x 的形成和分解动力学机理已经通过试验得到验证，这些试验包括层流预混火焰或激波管的研究，其中分子扩散条件已被完全确定。然而，在任何实际的燃烧系统中，燃烧都是高度紊流的。紊流混合过程导致了温度和组分的瞬时波动，这将会影响火焰的性能。

NO_x 的生成速率，温度和组分浓度之间的关系是高度非线性的。因此，如果在任何模型中使用时均组分和温度来预测平均的 NO_x 生成速率，将会产生明显的误差。温度和组分的波动必须通过引入描述时间变化的概率密度函数来加以考虑。

紊流-化学交互模型

在紊流燃烧计算中，FLUENT 求解密度加权、时均的 N-S 方程来获得温度、速度和组分浓度或者平均混合物比例和变动。要计算 NO 浓度，就必须在区域中的每一点使用平均流场信息计算时均的 NO 生成速率。

平均紊流反应速率的建模方法可以根据动量法或随机密度函数（PDF）技术来进行。FLUENT 采用的就是 PDF 方法。

!! 这里所述的 PDF 方法仅应用于 NO_x 输运方程。前面的燃烧仿真既可以用 Magnussen and Hjertager 的通用有限反应速率化学模型，也可以使用非预混燃烧模型。关于这些燃烧模型的详情，请参见 13 和 14 章

PDF 方法

PDF 方法已被证明在紊流的理论描述方面非常有用。在 FLUENT NO_x 模型中，根据整理后的温度，组分质量分数的单一或联合参数 PDF 或两者的结合的 PDF 方法被用于预测 NO_x 排放。如果使用非预混燃烧模型去模拟燃烧，那么基于混合物比例的一个或两个变量的 PDF 也可以使用。构建 PDF 方法所需的独立变量的平均值从输运方程的解中获得。

平均反应率的一般表达式

平均紊流反应率 $\overline{w}$ 可以根据瞬时速率 w 和各个变量的单一或联合 PDF 来描述。

通常为，

$$\overline{w} = \int \cdots \int w(V_1, V_2, \ldots) P(V_1, V_2, \ldots) dV_1 dV_2 \ldots \tag{17.1.79}$$

其中 $V_1, V_2, \ldots$ 为温度和/或出现的各个组分浓度。P 是随机密度函数(PDF)

FLUENT 中使用的平均反应速率

PDF 用于衡量 NO 生成的瞬时速率(e.g.,方程 17.1-20)的权重以及在适合范围的相应的积分，从而获得平均紊流反应速率。因此，我们有

$$\overline{S}_{NO} = \int S_{NO}(V_1) P_1(V_1) dV_1 \tag{17.1.80}$$

或者，对于两个变量

$$\overline{S}_{NO} = \int\int S_{NO}(V_1, V_2,)P(V_1, V_2)dV_1 dV_2 \tag{17.1.81}$$

其中 $\overline{S}_{NO}$ 是 NO 生成的平均紊流速率，S_{NO} 是由方程 17.1-20 给定的瞬时生成率。$P_1(V_1)$ 和 $P(V_1, V_2)$是变量 V_1 和 V_2 的 PDF。对于源项 HCN 或 NH_3 也可以使用同样的处理方法。

方程 17.1-80 或 17.1-81 必须在每个节点和迭代步进行积分。对于温度的 PDF，积分的上下限有燃烧解中的最小和最大值来决定。对于混合物比例的 PDF，方程 17.1-80 或 17.1-81 中积分的上下限由储存在查找表中的值来决定。

统计独立性

在两变量 PDF 情况下，进一步假定变量 V_1 和 V_2 是统计独立的，这样 $P(V_1, V_2)$ 就可以表示为

$$P(V_1, V_2) = P_1(V_1)P_2(V_2) \tag{17.1.82}$$

Beta PDF 假定

假定 P 为适用于燃烧计算的两时刻 beta 函数。beta 函数的方程为：

$$P(V) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}V^{\alpha-1}(1-V)^{\beta-1} = \frac{V^{\alpha-1}(1-V)^{\beta-1}}{\int_0^1 V^{\alpha-1}(1-V)^{\beta-1}dV} \tag{17.1.83}$$

其中 $\Gamma(\ )$ 为 Gamma 函数，α 和 β 取决于 $\overline{m}$，量的平均值有问题，而其方差值 σ^2：

$$\alpha = \overline{m}\left(\frac{\overline{m}(1-\overline{m})}{\sigma^2} - 1\right) \tag{17.1.84}$$

$$\beta = (1-\overline{m})\left(\frac{\overline{m}(1-\overline{m})}{\sigma^2} - 1\right) \tag{17.1.85}$$

Beta 函数要求独立变量 V 必须假定为 0 到 1 之间的值。这样，这样流场参数比如温度就必须进行标准化

σ^2 的计算方法

方差 σ^2 可以通过在燃烧计算阶段求解输运方程来计算。这种方法计算量大，不适用于 NO_x 预测的后处理过程。方差 σ^2 的计算是基于方差输运方程的近似形式进行的。

方差 σ^2 的输运方程可以由下式获得：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\sigma^2\right) + \nabla\cdot(\rho\vec{v}\sigma^2) = \nabla\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\nabla\sigma^2\right) + C_g\mu_t(\nabla\overline{m})^2 - C_d\rho\frac{\epsilon}{k}\sigma^2 \tag{17.1.86}$$

其中常数 σ_t, C_g 和 C_d 可以分别取值 0.85, 2.86,和 2.0。假定方差的生成和耗散相等，则可以得到

$$\sigma^2 = \frac{\mu_t}{\rho}\frac{k}{\epsilon}\frac{C_g}{C_d}(\nabla\overline{m})^2 = \frac{\mu_t}{\rho}\frac{k}{\epsilon}\frac{C_g}{C_d}\left[\left(\frac{\partial\overline{m}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\overline{m}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\overline{m}}{\partial z}\right)^2\right] \quad (17.1.87)$$

括号中的项为独立变量的耗散率。

对于混合物比例中的 PDF，混合物比例方差已作为基本燃烧计算的一部分进行了求解，因此 σ^2 不需要额外的计算。

17.1.8 使用 NO_x 模型

解耦分析：综述

燃烧系统中生成的 NO_x 的浓度通常较低。因此，NO_x 化合物对预测流场，温度和主燃烧产物浓度几乎不产生影响。使用 NO_x 模型的最有效的方式就是作为主燃烧计算的后处理器。

推荐的程序如下：

1. 通常使用 FLUENT 计算燃烧问题
2. 激活所需的 NO_x 模型（热力型，燃料型，和/或快速型 NO_x，有或无再燃），如本节中所述设置正确的参数。

   Define →Models →Pollutants →NOx...

3. 在 **Solution Controls** panel 菜单中，关闭除 NO 组分外的所有参数，如果激活了燃料 NO_x 子模型，则关闭 HCN or NH_3.

   Solve →Controls Solution...

4. 同样在 **Solution Controls** panel 菜单中，在 relaxation 选项下为 NO 设置合适的值（有时还要调 HCN 或 NH_3）。尽管对于特定问题可能需要较低值，但通常建议选用 0.8 到 1.0。也就是说，如果无法获得收敛，尝试使用较低的 relaxation 值。
5. 在 **Residual Monitors** panel 菜单中，降低 NO 的收敛临界值（有时也调 HCN 或 NH_3）到 10^{-6}。

   Solve →Monitors →Residual...

6. 进行计算直至收敛（比如，直到 NO 组分（和 HCN or NH_3，如果求解）残量低于 10^{-6}）以确保 NO 和 HCN 或 NH_3，的浓度场不再变化。
7. 以通常方式，用阿拉伯数字和/或图形工具显示 NO（和 HCN 或 NH_3）的质量分数。
8. 如果需要的话，保存新的 case 和 data 文件。

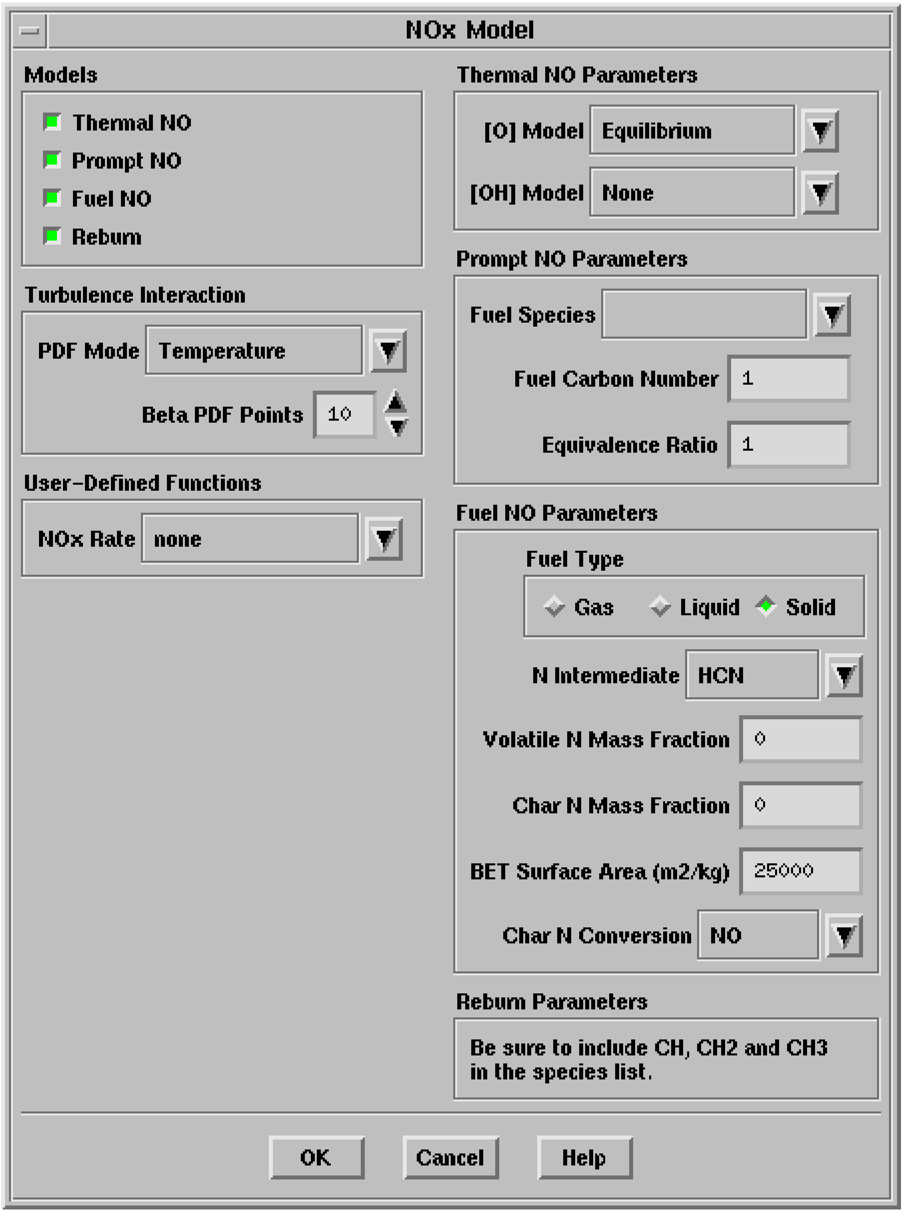
具体到 NO_x 生成计算的输入在本节随后的部分中进行解释。

激活 NO_x 模型

要激活 NOx 模型并设置相关的参数，应使用 **NOx Model** panel (Figure 17.1.1).

Define →Models →Pollutants →NOx...

Figure 17.1.1: The **NOx Model** Panel



在 **Models** 下，选择要在计算 NO 和 HCN 浓度时使用的 NO_x 模型。

- 要选中 thermal NO_x，开启 **Thermal NO** 选项
- 要选中 prompt NO_x，开启 **Prompt NO** 选项
- 要选中 fuel NO_x，开启 **Fuel NO** 选项
- 要选中 NO 再燃，开启 **Reburn** 选项（注意除非你激活了以上所列出的其他 NO 模型，否则 **Reburn** 选项将不会显示）

你关于 **Models** 的选择将激活 thermal, prompt, 和/或 fuel NO, 有或无再燃的计算，这要与本节中描述的化学动力学模型相一致。平均 NO 生成速率可以从流场中的平均浓度和温度直接计算得到。

设置 Thermal NO_x 参数

计算热 NO_x 通常使用三种方法（如 17.1.3 节中所述）。你可以在 **NO_x Model** 菜单中确

定要使用的方法。

参数：

- 要选择平衡方法，在[O]Model 下拉菜单中选择 **Equilibrium**
- 要选择部分平衡方法，在[O]Model 或[OH]Mode 下拉菜单中选择 **Partial-Equilibrium**
- 要使用预测的 O 和/或 OH 浓度，在[O]Model 或[OH]Mode 下拉菜单中选择 **Instantaneous**

设置 Prompt NO_x 参数

Prompt NO 生成预测使用方程 17.1-30 和 17.1-32。参数在 **NO_x Model** panel 菜单的 **Prompt NO Parameters** 中输入：

- 通过选择 **Fuel Species** 下拉菜单，确定哪一个定义的组分是燃料。
- 设置 **Fuel Carbon Number**（每摩尔燃料中的碳原子数）
- 设置等效比：

$$\text{Equivalence Ratio} = \frac{\text{actual air-to-fuel ratio}}{\text{stoichiometric air-to-fuel ratio}}$$

设置燃料型 NO_X 参数

对于燃料型 NO_X 模型，你首先需要在燃料 NO 参数设置面板下指定燃料的类型：

- 对于气体燃料 NO_X，在燃料类型下选择气体。
- 对于液体燃料 NO_X，在燃料类型下选择液体。
- 对于固体燃料 NO_X，在燃料类型下选择固体。

注意每次你只能用一个燃料模型。

设置气体与液体燃料 NO_X 参数

如果你在燃料 NO 参数设置下燃料类型选择气体或者液体，你也需要指定下列参数：

- 在 N intermediate 下拉列表中选择中间类型（HCN 或者 NH3）
- 在燃料 N 质量分数区域，设置氮气在燃料（kg 氮气在 kg 燃料）中正确的质量分数。对于气体或者液体燃料，FLUENT 可以用方程 17.1-34 和 17.1-35（对 HCN）或者方程 17.1-45 和 17.1-46（对 NH_3）预测 NO 的形成。

设置固体（煤）燃料 NO_X 参数

对于固体燃料，FLUENT 用方程 17.1-60 和 17.1-61（对 HCN）或者方程 17.1-67 和 17.1-68（对 NH_3）预测 NO 的形成。对于煤燃料 NO_X 模型需要几个输入（在燃料 NO 参数下）：

- 在 N intermediate 下拉列表中选择中间类型（HCN 或者 NH_3）
- 分别在挥发 N 质量分数和烧焦 N 质量分数里面的挥发和烧焦中给定氮气的质量分

数。

- 在 BET 表面面积区域，定义粒子 BET 内部孔表面面积（详见 17.1.5 部分）
- 从烧焦 N 转换下拉列表中，例如 NO，HCN，或者 NH_3，选择烧焦 N 转换的途径。注意只有在 N intermediate 下拉列表中选择相同中间类型，HCN 或者 NH3 才可以被选择。

设置 NO_X 再燃参数

对于 NO_X 再烧模型不用给定很特别的参数。当你用这个模型，你必须确信在你问题定义中包括 CH，CH_2 和 CH_3，当被警告在 NO_X 模型面板中再烧参数部分。详见 17.1.6。

设置紊流参数

当你计算给定 NO 形成（热力型，快速型，和/或燃料，有/没有再烧），如果你想考虑紊流的波动（如在 17.1.7 中描述）， 在紊流 interaction 的 PDF 模型下拉列表中选择一个设项。

- 选择温度，考虑温度波动的影响。
- 选择温度/组分，考虑在组分下拉列表（当选择这个选项会出现）选择组分的温度和质量分数波动的影响。
- 选择组分 1/组分 2，考虑在组分 1 和组分下拉列表（当选择这个选项会出现）中选择的两组分质量分数波动的影响。
- （只有非预混燃烧计算）选择混合物分数，考虑混合物分数波动的影响。

只有在反应系统中用非预混燃烧模型，混合物分数选项才可以利用。如果用了混合物分数选项，瞬时温度，密度和组分浓度可以从以混合物分数为函数的 PDF 查询表格（由 prePDF 创建）里面得到。混合物分数中的 beta PDF 可以从每个单元的混合物分数和变化计算得到。然后瞬时 NO_X 率可以在每个单元里面算出来。他们可以用混合物分数 PDF 旋转产生紊流中的平均率。

在混合物分数中用 PDF，对于不绝热、非预混燃烧计算的额外输入

如果选择了混合物分数选项，用了不绝热、非预混燃烧模型，一个附加选项（use top temperature）将在 turbulence interaction 下出现。当这个选项关闭（缺省条件）， 当地单元的焓将被用于计算 NO_X 产生率的瞬时温度的计算。这个选项在大多数算例中用。如果打开了 use top temperature，在紊流波动很主要的区域，瞬时温度根据最低热量损失（或者最大热量增加）在这些区域。（在 14.1.2 部分中的方程，热损失/增加是 H^*）通过利用混合物分数 PDF 旋转计算的结果是最大可能的 NO_X 产生量。通过比较缺省的结果和应用 top temperature 选项产生的结果，在波动很重要的时候，我们可以确定 NO_X 计算对当地焓变化有多么敏感。

Beta 点的数值

可以选择调整 beta PDF 点的数值。缺省值为 10，表示方程 17.1-80 或者方程 17.1-81 中的 beta 函数将在柱状图的基础上在 10 点上积分，将产生合理计算时间的正确解。增加这个值可以提高正确性，但也会增加计算时间。

对 NO_X 产生率给定自己定义的函数

你可以有选择的为 NO_X 产生率选择自己定义的模型。从 UDF 从返回的产生率被加到从标准 NO_X 产生选项返回的产生率上。你也可以选择去掉所有标准 NO_X 产生选项，只用 UDF 产生率。

在自定义函数的 NO_X 产生率下拉列表中选择合适的函数。详见单独的 UDF 手册，有关自定义函数的详细介绍。

后处理

当计算 NO_X 的形成，下列附加变量要在后处理里面使用：

- NO 质量分数
- HCN 质量分数（只有 NO_X 模型使用）
- NH_3 质量分数（只有 NO_X 模型使用）
- NO 摩尔分数
- HCN 摩尔分数（只有 NO_X 模型使用）
- NH_3 摩尔分数（只有 NO_X 模型使用）
- NO 浓度
- HCN 浓度（只有 NO_X 模型使用）
- NH_3 浓度（只有 NO_X 模型使用）
- 温度变化（标准温度变化）

这些变量包含在出现在后处理面板上变量选择下拉列表的 NO_X 分类中。

17.2 烟灰形成

在下面的几节里将要介绍关于烟灰形成的内容

- Section 17.2.1：概述与约定
- Section 17.2.2：原理
- Section 17.2.3：烟灰模型的使用

17.2.1 概述与约定

FLUENT 提供了两个经验模型来预测燃烧系统中的烟灰形成。除此之外，在燃烧系统内，对辐射吸收系数的预测过程中还包括了预测的烟灰浓度。当使用 P-1，离散坐标系，或带有可变吸收系数的离散传递辐射模型时，要考虑到烟灰对辐射吸收的影响。

预测烟灰形成

FLUENT 使用以下两个模型中的任意一个来预测燃烧系统中的烟灰浓度：

- 单步Khan and Greeves model 【113】，它是建立在一个简单经验公式基础上的，用来

预测烟灰形成速度。

- 双步Tesner model 【149, 242】，用来预测粒子的形成，同时在粒子表面形成烟灰。

在用FLUENT预测烟灰形成时，系统默认使用Khan and Greeves模型。在这两个模型中，烟灰（和粒子）的燃烧遵守Magnussen燃烧速度公式【149】。注意：烟灰形成模型的使用只适用于紊流。FLUENT不能预测层流或无粘流的烟灰形成。

这两个模型是建立在经验基础上的，是燃烧系统烟灰形成过程的近似模型。其详细的化学和物理过程是非常复杂的，目前只能通过FLUENT的模型近似得出。

只有在保证试验结果有效的条件下，才能把模型得出的结果作为系统性能的定性量度。

对烟灰模型的一些约定

对烟灰形成模型做以下的约定：

- 必须使用离散解析器。烟灰模型不能用任何耦合解析器。
- 烟灰形成模型只适用于紊流。
- 烟灰模型不能和预混燃烧模型同时使用。

17.2.2 原理

烟灰形成的单步模型

在单步模型Khan and Greeves model【113】中，FLUENT解一个单独的烟灰质量分数输运方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\rm soot}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\rm soot}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\rm soot}} \nabla Y_{\rm soot}\right) + \mathcal{R}_{\rm soot} \qquad (17.2\text{-}1)$$

其中，

Y_{soot}＝烟灰质量分数

σ_{soot}＝烟灰输运的紊流普朗特数

R_{soot}＝烟灰形成净速率（kg/m^3-s）

烟灰形成的净速率R_{soot}，是烟灰形成$R_{soot,form}$和烟灰燃烧$R_{soot,comb}$之差：

$$\mathcal{R}_{\rm soot} = \mathcal{R}_{\rm soot,form} - \mathcal{R}_{\rm soot,comb} \qquad (17.2\text{-}2)$$

烟灰形成的速率可以用一个简单的经验公式表达：

$$\mathcal{R}_{\rm soot,form} = C_s p_{\rm fuel} \phi^r e^{-E/RT} \qquad (17.2\text{-}3)$$

其中，

C_s＝烟灰形成常数（kg/N-m-s）

P_{fuel}＝燃料粒子压力（Pa）

ϕ＝当量比

r＝当量比指数

E/R＝活化温度（K）

烟灰燃烧的速率是以下两个速度表达式[162]中的最小值：

$$\mathcal{R}_{\mathrm{soot,comb}} = \min[\mathcal{R}_1,\ \mathcal{R}_2]$$ （17.2-4）

$$\mathcal{R}_1 = A\rho Y_{\mathrm{soot}}\frac{\epsilon}{k}$$ （17.2-5）

$$\mathcal{R}_2 = A\rho\left(\frac{Y_{\mathrm{ox}}}{\nu_{\mathrm{soot}}}\right)\left(\frac{Y_{\mathrm{soot}}\nu_{\mathrm{soot}}}{Y_{\mathrm{soot}}\nu_{\mathrm{soot}} + Y_{\mathrm{fuel}}\nu_{\mathrm{fuel}}}\right)\frac{\epsilon}{k}$$ （17.2-6）

其中，

A＝Magnussen模型中的常数

Y_{ox} , Y_{fuel}＝氧化剂和燃料的质量分数

υ_{soot} , υ_{fuel}＝烟灰和燃料燃烧的质量当量数

单步模型中的默认常数在烃类燃料中相当大的范围里都适用。

烟灰形成的双步模型

双步模型Tesner model 【242】，用来预测基本粒子的生成和粒子表面烟灰的形成。FLUENT解两个标量输运方程：烟灰质量百分数（方程17.2-1）和标准化后的基本粒子浓度：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho b^*_{\mathrm{nuc}}) + \nabla\cdot(\rho\vec{v}b^*_{\mathrm{nuc}}) = \nabla\cdot\left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\mathrm{nuc}}}\nabla b^*_{\mathrm{nuc}}\right) + \mathcal{R}^*_{\mathrm{nuc}}$$ （17.2-7）

其中，

b^*_{nuc} ＝标准化后的基本粒子的浓度（粒子×10^{-15}/kg）

σ_{nuc}＝粒子输运的紊流普朗特数

$\mathcal{R}^*_{\mathrm{nuc}}$ ＝标准化后的粒子净生成速率（粒子×10^{-15}/m^3-s）

在这些输运方程中，粒子和烟灰生成的速率是净速率，应该是其形成和燃烧之差。

烟灰形成速度

双步模型计算烟灰形成的净速率R_{soot}的方法和单步模型是一样的，是烟灰形成和烟灰燃烧之差。

$$\mathcal{R}_{\mathrm{soot}} = \mathcal{R}_{\mathrm{soot,form}} - \mathcal{R}_{\mathrm{soot,comb}}$$ （17.2-8）

但是在双步模型里，烟灰形成的速率$R_{soot,form}$取决于基本粒子的浓度c_{nuc}

$$\mathcal{R}_{\mathrm{soot,form}} = m_p(\alpha - \beta N_{\mathrm{soot}})c_{\mathrm{nuc}}$$ （17.2-9）

其中，

m_p＝烟灰粒子的平均质量（kg/particle）

N_{soot}＝烟灰粒子的浓度（particle/m^3）

C_{nuc}＝基本粒子浓度＝ρb_{nuc}（particle/m^3）

α ＝经验常数（s^{-1}）

β ＝经验常数（m^3/particle-s）

烟灰燃烧速率的计算方法和单步模型是相同的，即方程17.2-4－17.2-6。

双步模型的默认常数适用于乙炔的燃烧，根据文献[1]，由于乙炔的烟灰特性对于不同

饱和的烃类燃料是不同的，所以对于其他的燃料，这些值应作修正。

粒子生成速度

双步模型的粒子净生成速率是粒子生成速率与粒子燃烧速率之差：

$$\mathcal{R}^*_{\rm nuc} = \mathcal{R}^*_{\rm nuc,form} - \mathcal{R}^*_{\rm nuc,comb} \qquad (17.2\text{-}10)$$

其中，

$\mathcal{R}^*_{\rm nuc,form}$ ＝粒子生成速率（粒子×10^{-15}/m^3-s）

$\mathcal{R}^*_{\rm nuc,comb}$ ＝粒子燃烧速率（粒子×10^{-15}/m^3-s）

粒子生成速率 $\mathcal{R}^*_{\rm nuc,form}$ 取决于一个自发的形成和分支过程，可由下列式子表示：

$$\mathcal{R}^*_{\rm nuc,form} = \eta_0 + (f-g)c^*_{\rm nuc} - g_0 c^*_{\rm nuc} N_{\rm soot} \qquad (17.2\text{-}11)$$

$$\eta_0 = a^*_0 c_{\rm fuel} e^{-E/RT} \qquad (17.2\text{-}12)$$

其中，

$c^*_{\rm nuc}$ ＝标准化的粒子浓度（＝$\rho b^*_{\rm nuc}$）

$a^*_0 = a_0/10^{15}$

a_0 ＝指数前速度常数（粒子/kg-s）

$c_{\rm fuel}$ ＝燃料浓度（kg/m^3）

f-g＝线性分支－终端系数（s^{-1}）

g_0＝烟灰粒子上的线性终端（m^3/粒子-s）

注意：只有当运动速度 η_0比限定的生成速度（默认值为10^5 粒子/m^3-s）高时，方程17.2-11才能包含分支项 $(f-g)c^*_{\rm nuc}$。

粒子燃烧速度假定和烟灰燃烧速度成比例：

$$\mathcal{R}^*_{\rm nuc,comb} = \mathcal{R}_{\rm soot,comb}\frac{b^*_{\rm nuc}}{Y_{\rm soot}} \qquad (17.2－13)$$

其中，烟灰燃烧速度 $\mathcal{R}_{\rm soot,comb}$ 已由方程17.2-4给出。

烟灰对辐射吸收系数的影响

11.3.8小节中已经介绍了烟灰－辐射相互作用的模型。

17.2.3 使用烟灰模型

为了计算烟灰的生成，必须从一个收敛的流动解算起。下面几页将详细说明一个烟灰生

成模型的建立和求解。请注意这里只写出了跟烟灰模型相关的步骤。对于和烟灰生成模型同时使用的其他模型的输入信息，请参照该模型的相应节次。

1. 按照通常的程序使用FLUENT计算紊流燃烧问题（有限速度或非预混情况）
2. 按本节描述的内容，选择所需要的烟灰生成模型，设置相应的参数。

Define → Models → Pollutants → Soot...

3. 在求解控制面板里，除了烟灰外（如果你使用双步模型，还应包括粒子），关闭所有其他变量的解。

Solve → Controls → Solution...

4. 在求解控制面板里，设置一个合适的值作为烟灰的亚松弛因子。尽管对于研究的问题可能需要一个更低的值，但推荐使用0.8。也就是说，如果达不到收敛，可以试试一个更小的亚松弛因子。
5. 在残差监视面板里，减少烟灰（对于双步模型，包括粒子）的收敛标准到10^{-5}。

Solve → Monitors → Residual...

6. 定义烟灰（对于双步模型，包括粒子）进口流动的边界条件。

Define → Boundary Conditions...

7. 执行计算直到收敛为止（例如，直到烟灰－和粒子，双步模型－的残差小于10^{-5}）以保证烟灰（粒子）的流场不再展开。
8. 按照通常的方法使用文字或图片描述一下烟灰（和粒子）的质量百分数
9. 如果需要，储存case和数据文件。
10. 如果想计算烟灰和流场的耦合解，再打开其他的变量，重新计算直到收敛。（参考本节末尾对于耦合计算的一些建议）

选择烟灰模型

通过烟灰模型面板，可以选择一个烟灰模型用于烟灰生成的计算。

Define → Models → Pollutants → Soot...

在烟灰模型面板里，可以选择单步或双步模型，选择完后，面板会展开显示适合的输入。（如果你想考虑烟灰形成对辐射吸收系数的影响，在Soot-Rediation Interaction下打开一般模型选项（Generalized Model））

设置燃烧过程参数

对于两个模型，接下来要定义过程的参数，这取决于你所建立的模型燃烧过程。输入参数包括燃料和烟灰燃烧的当量，对于双步模型，还要包括烟灰粒子的平均尺寸和密度。

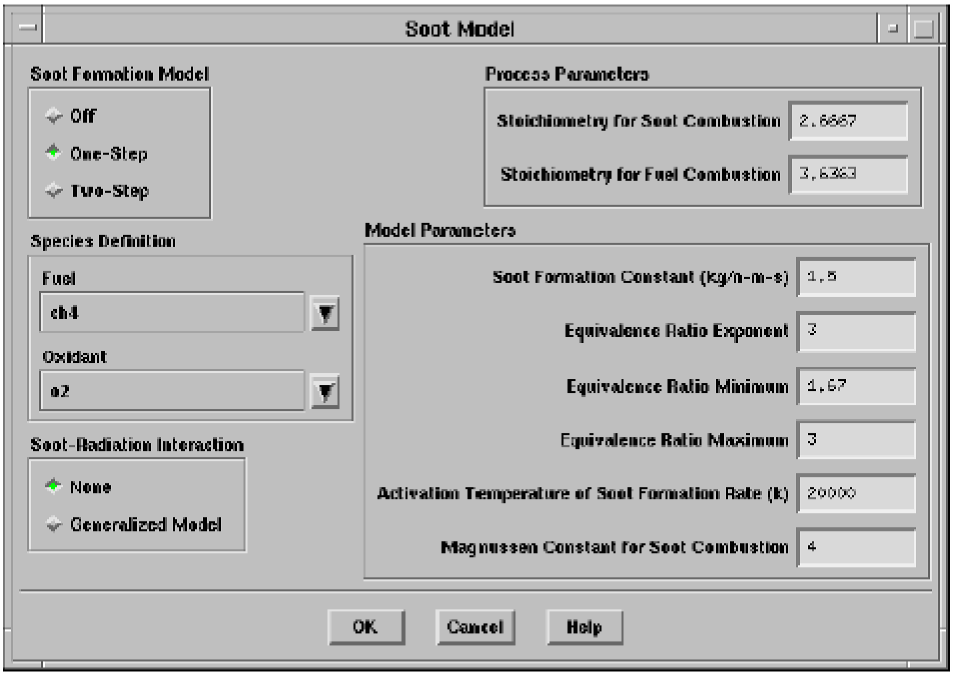


图17.2.1 烟灰模型控制面板

烟灰粒子的平均直径和平均密度项目是假定的燃烧系统的平均直径和平均密度，用来计算双步模型方程17.2-9的烟灰粒子质量m_p。注意：烟灰密度和直径的默认值采用文献[162]的值。当使用单步模型时，这些参数不会出现。

烟灰燃烧的当量项目是方程17.2-6里的质量当量υ_{soot}，用来计算模型的烟灰燃烧速度。FLUENT提供了默认值2.6667，同时假定烟灰是纯碳，氧化剂是氧气。

燃料燃烧当量项目是方程17.2-6里的质量当量υ_{fuel}，用来计算模型的烟灰燃烧速度。

FLUENT提供了默认值3.6363，适用于氧气O_2和丙烷C_3H_8的燃烧。

定义燃料和氧化剂的类别

除了定义燃料和烟灰燃烧的当量外，还需定义模型中所使用的化学燃料和氧化剂。在烟灰模型面板下的类别定义项里，在燃料和氧化剂下拉菜单内分别选择燃料和氧化剂。

如果在燃烧计算中使用非预混模型，并且在prePDF中定义的燃气是混合物，你应该选择最适当的类别作为燃料类型。同样地，选择最重要的氧化剂部分（例如氧气）作为氧化剂。

单步模型的模型参数设置

当选择单步模型时，要定义的模型参数是用在方程17.2-3，17.2-5和17.2-6中的。烟灰形成常数是方程17.2-3中的参数Cs。当量比指数是方程17.2-3中的指数r，当量比最小值和最大值分别是方程17.2-3中的燃料当量比φ的最小值和最大值。只有φ介于最小值和最大值之间时，方程17.2-3才可解；如果φ不再这个范围内，则不会形成烟灰。

烟灰形成的活化温度是方程17.2-3中的E/R项。

烟灰燃烧Magnussen常数是常数A，用在烟灰燃烧速率方程17.2－5和17.2－6中的速度表达式中。

注意：这些默认值适用于丙烷燃料，对大多数的烃类燃料也是有效的。

双步模型的模型参数设置

当选择双步模型时，要定义的模型参数是用在方程17.2-5，17.2-6，17.2-9，17.2-11和17.2-12中的:

粒子形成速度限定值是方程17.2-12中的运动粒子生成速度限定值 η_0。在这个限定值下面，方程17.2-11中的分支和中止项（f-g）并没有包括。

粒子分支和中止系数是方程17.2－11中的（f-g）项。

烟灰上的粒子线性中止系数是方程17.2－11中的g_0项。

粒子形成指数前常数是方程17.2－12运动粒子生成项中的a0项，粒子形成速度的活化温度是方程17.2－12运动粒子生成项中的E/R项。

粒子形成速度的常数Alpha是烟灰生成速度方程17.2－9中的常数 α 。

粒子形成速度的常数Beta是烟灰生成速度方程17.2－9中的常数 β 。

烟灰燃烧Magnussen常数是常数A，用在烟灰燃烧速率方程17.2－5和17.2－6中的速度表达式中。

除了a0是文献[269]中的值之外，双步模型的默认值和文献[162]中的值是一样的（对于乙炔燃烧）。如果模型不是乙炔而是丙烷，建议把 α 的值改到3.5×10^8。对于特定的燃烧系统，应使用经验值作为输入，同时修改这些参数以得到更好的结果。

定义烟灰模型的边界条件

在流体入口边界，需要指定方程17.2－1中的烟灰质量百分比Y_{soot}，和（对于双步模型）方程17.2－7中的粒子质量浓度b^*_{nuc}。

Define → Boundary Conditions...

可以保留默认进口值为0，或者对于特定的燃烧系统指定适当的非零值。

耦合烟灰计算

如果要计算烟灰和流场的耦合解，一般需要增加烟灰（和粒子，对于双步模型）的收敛标准到10^{-4}。对于非耦合烟灰计算，可以保留推荐值10^{-5}，但是需要注意的是在这么小的误差下，耦合解有可能不收敛。

对于耦合计算，应该使用更小的亚松弛因子。在大多数情况下，0.2比较合适。

如果使用可变吸收系数建立了辐射换热模型，要计算耦合解，需要激活烟灰模型面板里的烟灰辐射相互作用(Soot－Radiation Interaction)菜单下的一般模型项(Generalized Model)。当选择了这个选项后，FLUENT将会包含烟灰对可变辐射吸收系数的影响，11.3.8小节描述了这种情况。

生成烟灰量报表

当模型中包括烟灰形成时，FLUENT提供了许多附加的报表选项。你可以生成下列项目的图表或文字报告：

- 烟灰的质量百分数
- 粒子的质量百分数（只对双步模型）

这些参数都包含在后处理面板（Postprocessing Panels）里的Soot下拉菜单目录里。

王巍雄——2003-6-19

18. 多相流模拟介绍

自然界和工程问题中会遇到大量的多相流动。物质一般具有气态、液态和固态三相，但是多相流系统中相的概念具有更为广泛的意义。在多项流动中，所谓的“相”可以定义为具有相同类别的物质，该类物质在所处的流动中具有特定的惯性响应并与流场相互作用。比如说，相同材料的固体物质颗粒如果具有不同尺寸，就可以把它们看成不同的相，因为相同尺寸粒子的集合对流场有相似的动力学响应。本章大致介绍一下 Fluent 中的多相流建模。第 19 章和第 20 章将会详细介绍本章所提到的内容。第 20 章会介绍一下融化和固化方面的内容

- 18.1 多相流动模式
- 18.2 多相系统的例子
- 18.3 多相建模方法
- 18.4 多相流模型的选择

18.1 多相流动模式

我们可以根据下面的原则对多相流分成四类：

- 气-液或者液-液两相流：
  - 气泡流动：连续流体中的气泡或者液泡。
  - 液滴流动：连续气体中的离散流体液滴。
  - 活塞流动: 在连续流体中的大的气泡
  - 分层自由面流动：由明显的分界面隔开的非混合流体流动。
- 气-固两相流：
  - 充满粒子的流动：连续气体流动中有离散的固体粒子。
  - 气动输运：流动模式依赖诸如固体载荷、雷诺数和粒子属性等因素。最典型的模式有沙子的流动，泥浆流，填充床，以及各向同性流。
  - 流化床：由一个盛有粒子的竖直圆筒构成，气体从一个分散器导入筒内。从床底不断充入的气体使得颗粒得以悬浮。改变气体的流量，就会有气泡不断的出现并穿过整个容器，从而使得颗粒在床内得到充分混合。
- 液-固两相流
  - 泥浆流：流体中的颗粒输运。液-固两相流的基本特征不同于液体中固体颗粒的流动。在泥浆流中，Stokes 数（见方程 18.4-4）通常小于 1。当 Stokes 数大于 1 时，流动成为流化（fluidization）了的液-固流动。
  - 水力运输: 在连续流体中密布着固体颗粒
  - 沉降运动: 在有一定高度的成有液体的容器内，初始时刻均匀散布着颗粒物质。随后，流体将会分层，在容器底部因为颗粒的不断沉降并堆积形成了淤积层，在顶部出现了澄清层，里面没有颗粒物质，在中间则是沉降层，那里的粒子仍然在沉降。在澄清层和沉降层中间，是一个清晰可辨的交界面。
- 三相流 (上面各种情况的组合)

上述的各种流动模式如图 18.1.1 所示：

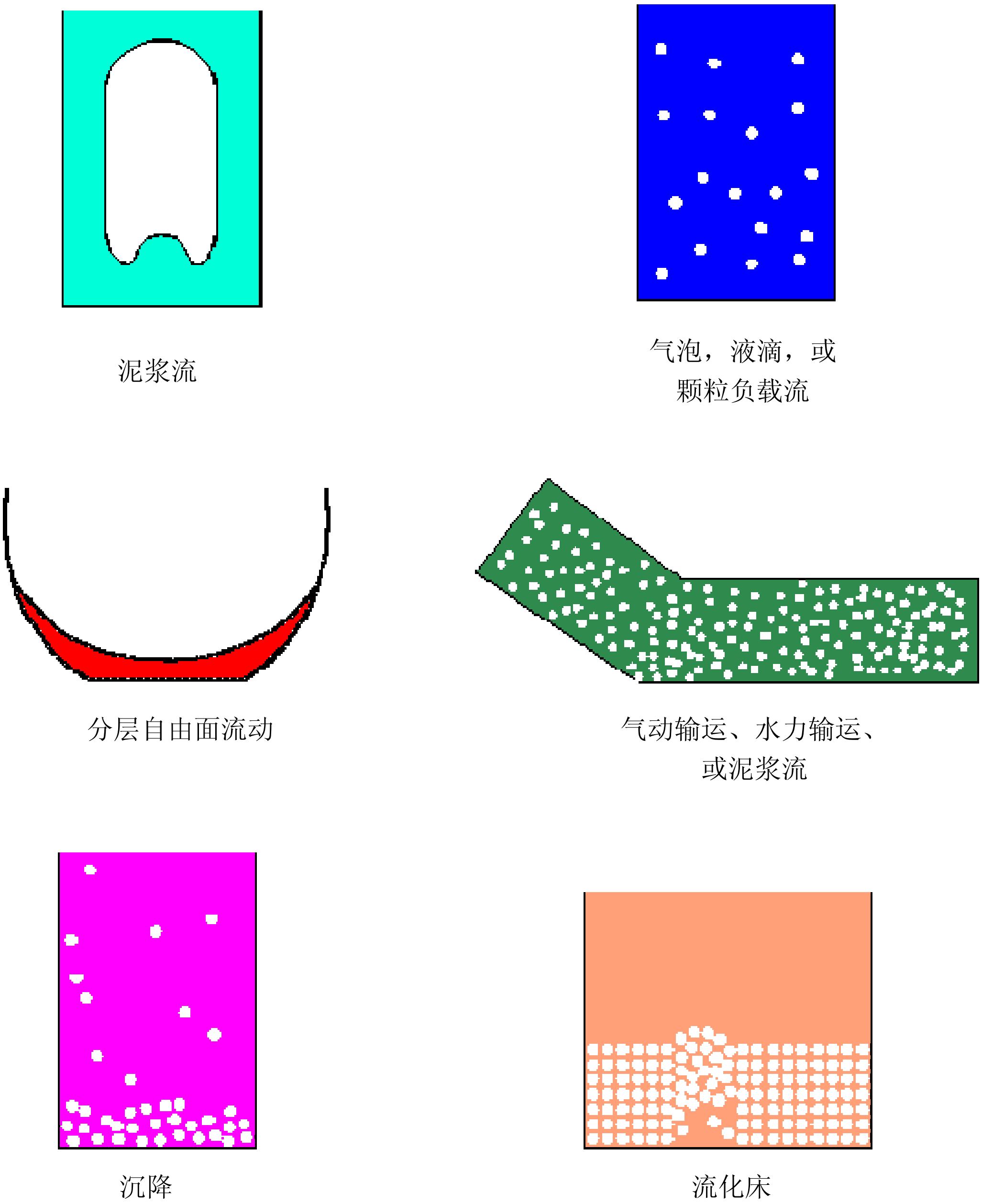


图 18.1.1 多相流动模式

18.2 多相系统的例子

18.1 节给出的各流动模式对应的例子如下：

- 气泡流例子：抽吸，通风，空气泵，气穴，蒸发，浮选，洗刷
- 液滴流例子：抽吸，喷雾，燃烧室，低温泵，干燥机，蒸发，气冷，刷洗
- 活塞流例子：管道或容器内有大尺度气泡的流动
- 分层自由面流动例子： 分离器中的晃动，核反应装置中的沸腾和冷凝
- 粒子负载流动例子：旋风分离器，空气分类器，洗尘器，环境尘埃流动

- 风力输运例子：水泥、谷粒和金属粉末的输运
- 流化床例子：流化床反应器，循环流化床
- 泥浆流例子: 泥浆输运，矿物处理
- 水力输运例子：矿物处理，生物医学及物理化学中的流体系统
- 沉降例子：矿物处理

18.3 多相建模方法

计算流体力学的进展为深入了解多相流动提供了基础。目前有两种数值计算的方法处理多相流：欧拉－拉格朗日方法和欧拉－欧拉方法。

- 18.3.1 欧拉－拉格朗日方法
- 18.3.2 欧拉－欧拉方法

18.3.1 欧拉－拉格朗日方法

在 Fluent 中的拉格朗日离散相模型（详见第 19 章）遵循欧拉－拉格朗日方法。流体相被处理为连续相，直接求解时均纳维-斯托克斯方程，而离散相是通过计算流场中大量的粒子，气泡或是液滴的运动得到的。离散相和流体相之间可以有动量、质量和能量的交换。

该模型的一个基本假设是，作为离散的第二相的体积比率应很低，即便如此，较大的质量加载率（$\dot{m}_{\rm particles} \geq \dot{m}_{\rm fluid}$）仍能满足。粒子或液滴运行轨迹的计算是独立的，它们被安排在流相计算的指定的间隙完成。这样的处理能较好的符合喷雾干燥，煤和液体燃料燃烧，和一些粒子负载流动，但是不适用于流-流混合物，流化床和其他第二相体积率不容忽略的情形。

18.3.2 欧拉－欧拉方法

在欧拉－欧拉方法中，不同的相被处理成互相贯穿的连续介质。由于一种相所占的体积无法再被其他相占有，故此引入相体积率（phasic volume fraction）的概念。体积率是时间和空间的连续函数，各相的体积率之和等于 1。从各相的守恒方程可以推导出一组方程，这些方程对于所有的相都具有类似的形式。从实验得到的数据可以建立一些特定的关系，从而能使上述方程封闭，另外，对于小颗粒流（granular flows），则可以通过应用分子运动论的理论使方程封闭。

在 FLUENT 中，共有三种欧拉-欧拉多相流模型，分别为：流体体积模型（VOF），混合物模型，以及欧拉模型。

VOF 模型

所谓 VOF 模型（详见第 20.2 节），是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法。当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时，可以采用这种模型。在 VOF 模型中，不同的流体组分共用着一套动量方程，计算时在全流场的每个计算单元内，都记录下各流体组分所占有的体积率。VOF 模型的应用例子包括分层流，自由面流动，灌注，晃动，液体中大气泡的流动，水坝决堤时的水流，对喷射衰竭（jet breakup）(表面张力)的预测，以及求得任意液－气分界面的稳态或瞬时分界面。

混合物模型

混和物模型（详见第 20.3 节）可用于两相流或多相流（流体或颗粒）。因为在欧拉模型中，各相被处理为互相贯通的连续体，混和物模型求解的是混合物的动量方程，并通过相对速度来描述离散相。混合物模型的应用包括低负载的粒子负载流，气泡流，沉降，以及旋风分离器。混合物模型也可用于没有离散相相对速度的均匀多相流。

欧拉模型

欧拉模型（详见第 20.4 节）是 Fluent 中最复杂的多相流模型。它建立了一套包含有 n 个的动量方程和连续方程来求解每一相。压力项和各界面交换系数是耦合在一起的。耦合的方式则依赖于所含相的情况，颗粒流（流－固）的处理与非颗粒流（流-流）是不同的。对于颗粒流，可应用分子运动理论来求得流动特性。不同相之间的动量交换也依赖于混合物的类别。通过 FLUENT 的客户自定义函数（user-defined functions），你可以自己定义动量交换的计算方式。欧拉模型的应用包括气泡柱，上浮，颗粒悬浮，以及流化床。

18.4 多相流模型的选择

解决多相流问题的第一步，就是从 18.1 节中挑选出最能符合实际流动的模式。在 18.4.1 节中，将对如何根据不同的模式，挑选恰当的模型给出最基本的原则，然后在 18.4.2 节中，将就以下的问题给出具体的方法：即如何给定相与相之间（包括气泡，液滴，和粒子）耦合的程度，以及如何针对不同程度的耦合情况选择恰当的模型。

- 18.4.1 基本原则
- 18.4.2 细节指导

18.4.1 基本原则

通常，你一旦决定了采用何种模式最能符合实际的流动，那么就可以根据以下的原则来挑选最佳的模型。更为具体的指导，包括如何选择含有气泡，液滴和粒子的流动模型可以参见第 18. 4. 2 节。

- 对于体积率小于 10％的气泡、液滴和粒子负载流动，采用离散相模型。具体内容参见第 19 章。
- 对于离散相混合物或者单独的离散相体积率超出 10％的气泡、液滴和粒子负载流动，采用混合物模型（详见 20.3）或者欧拉模型（详见 20.4）。具体采用何种模型，可参考 18.4.2 和 20.1 所述。
- 对于活塞流，采用 VOF 模型。详见 20.2。
- 对于分层/自由面流动，采用 VOF 模型。详见 20.2。
- 对于气动输运，如果是均匀流动（详见 20.3），则采用混合物模型；如果是粒子流（详见 20.4），则采用欧拉模型。具体采用何种模型，可参考 18.4.2 和 20.1 节内容。
- 对于流化床，采用欧拉模型模拟粒子流。详见 20.4。
- 对于泥浆流和水力输运，采用混合物模型（详见 20.3）或欧拉模型（详见 20.4）。具体采用何种模型，可参考 18.4.2 和 20.1 节内容。
- 对于沉降，采用欧拉模型。详见 20.4。
- 对于更加一般的，同时包含若干种多相流模式的情况，应根据最感兴趣的流动特征，选择合适的流动模型。此时由于模型只是对部分流动特征做了较好模拟，其精度必然低于只包含单个模式的流动。

18.4.2 细节指导

对于分层流和活塞流，最直接的就是选择 VOF 模型，如 18. 4. 1 所述。选择其他的模型就不那么直接。一般来说，下面的一些参数可以帮助选择合适的多相流模型： 粒子的加载率，β，和斯托克斯数，St。（注意：这里“颗粒”一词泛指粒子，液滴和气泡）

粒子加载率的影响

粒子加载率对相之间的影响具有很大的作用。颗粒加载率定义为离散相的质量密度(d)和载体相的质量密度(c)之比:

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} \tag{18.4.1}$$

物质密度比为：

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_c} \tag{18.4.2}$$

气－固两相流中它大于 1000,液-固两相流中在 1 左右，而气－液两相流中小于 0.001。

利用这些参数，就可以估计粒子相中粒子之间的平均间隔距离。下面是由 Crowe et al.给出的一种估计方法[42]：

$$\frac{L}{d_d} = \left(\frac{\pi}{6}\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)^{1/3} \tag{18.4.3}$$

其中 $\kappa = \frac{\beta}{\gamma}$。 这些参数的信息对于决定如何来处理离散相是非常重要的。例如，对于某种气体－颗粒流动，其粒子加载率为 1，那么粒子间距 $\frac{L}{d_d}$ 就等于 8；于是粒子就可以看成相互孤立的（也就是说，粒子加载率很低）。

根据粒子加载率的不同，相之间的影响程度可以分为三类：

- 对于低加载率，相之间的耦合作用是单向的；就是说，作为载体的流体介质可以通过推动和涡漩影响粒子的运动，但是粒子对流体运动却没有影响。离散相，混合物以及欧拉模型都可以很好的处理这一类问题。由于欧拉模型是最消耗资源的，故此离散相和混合物模型相对更为合适。
- 对于中等的加载率，耦合作用成为双向的；就是说，流体通过推动和涡漩影响粒子运动的同时粒子反过来也通过消耗平均动量和涡漩来影响流动。离散相，混合物和欧拉模型都可以应用于这种情况，但是你需要考虑其他的一些影响因素来决定采用何种模型更为合适。可利用下文将要介绍的斯托克斯数作为判断的准则。
- 对于高加载率，在双向影响的基础上还有粒子压力和由粒子引起的粘性应力的耦合（是四向的耦合）。只有欧拉模型才能正确的处理此类问题了。

斯托克斯数的重要意义

对于具有中等粒子加载率的系统，通过估计斯托克斯数的大小可以帮助你选择合适的模型。斯托克斯数可以根据粒子响应时间和系统响应时间的关系来定义：

$$\mathrm{St} = \frac{\tau_d}{t_s} \tag{18.4.4}$$

其中 $\tau_d = \frac{\rho_d d_d^2}{18\mu_c}$ ，而 t_s 是根据所考察系统的特征长度(L_s)和特征速度(V_s)来定义的 $t_s = \frac{L_s}{V_s}$ 。

对于 $\mathrm{St} \ll 1.0$ 的情况，对载流而言，粒子将具有很好的跟随性，所以三种模型（离散相，混合物和欧拉模型）都可以采用，于是你可以选择最节省资源的模型（通常为混合物模型），或者根据到其他的因素选择最为合适的。对于 $\mathrm{St} > 1.0$ 的情况，粒子将独立于流场运动，此时选用离散相模型和欧拉模型比较合适。对于 $\mathrm{St} \approx 1.0$ 的情况，三种模型又都可以采用了，可以根据情况选择最节省资源的或者最为合适的的模型。

例子

某选矿器，特征长度为 1 m，特征速度为 10 m/s，于是对于直径为 30 微米的粒子，其斯托克斯数为 0.04，而对于 300 微米的粒子，其斯托克斯数为 4.0。显然，混合物模型就不适用于后者。

某矿处理机，特征长度为 0.2 m，特征速度为 2 m/s，则对 300 微米的粒子，斯托克斯数为 0.005。在此情况下，你可以选择混合物模型或者欧拉模型。（因为粒子体积率太高，采用离散相模型是不适合的，见下文所述）

其他考虑因素

牢记一点，即离散相模型只适用于低体积率的情况。但同时，也只有离散相模型才允许你指定颗粒的分布或者在多相流模型中同时加入燃烧模型。

译文说明

- 本文依据 FLUENT6.0 的 HELP 文件翻译而成。事先并未征得原文版权所有者 FLUENT 公司或其在中国代理人海基公司的同意。
- 本文的写作目的仅在于为在教育与科研领域从事研究工作的人员提供参考与帮助，无意于将其用于商业目的。
- 对本文在教育与科研领域的转移、存储、复制，本文作者不提供基于任何商业目的或有损于原文版权所有者的利益、形象等权益的帮助或便利。
- 对出于研究与教学目的人员或机构，中文翻译者愿意并尽其可能的提供帮助、商议或回应其它形式的要求。
- 一旦原文（英文）版权所有者对中文译文的发布提出异议并明确通知译文作者，同时援引有效、适用的法律、法规条款，译文作者愿意立刻终止其为本文的发布、传播而所作出的一切形式努力。

注：本文以 ADOBE 公司的 PDF 格式发布。如需要相应中文 WORD 格式文档，请发邮件到 west_wing@sohu.com.

用户指南
如何使用本手册
扩展内容
1 开始
2 用户界面
3 读/写文件
4 单位制
5 读入与操作网格
6 边界条件
7 物理属性
8 模拟基本的流动
9 模拟运动区域的流动
10 模拟湍流
11 模拟传热
12 组分输运与化学反应流动的模拟介绍
13 模拟组分输运与有限速率反应
14 模拟非预混燃烧
15 模拟预混燃烧
16 模拟部分预混燃烧
17 模拟污染物生成
18 模拟多相流动
19 离散相模型
20 多相流模型概览
21 模拟凝固与熔化
22 求解器的使用
23 自适应网格技术
24 创建用于数据显示／输出的表面
25 数据的可视化
26 输出文本形式数据的信息
27 流场计算中变量的定义
28 并行计算
29 菜单操作指南
符号说明
参考文献
索引

19．离散相模型

本章介绍 FLUENT 中可供选择的拉格朗日离散相模型及其使用方法。

本章内容的组织如下：

- 19.1 **离散相模型概述与应用范围**
- 19.2 **离散相的轨道计算**
- 19.3 **传热与传质的计算**
- 19.4 **射流（雾化）模型**
- 19.5 **连续相与离散相的相间耦合**
- 19.6 **离散相模型的使用方法概述**
- 19.7 **离散相模型的选择**
- 19.8 **非稳态颗粒的计算**
- 19.9 **离散相的初始条件设定**
- 19.10 **离散相的边界条件设定**
- 19.11 **离散相的介质属性设定**
- 19.12 **离散相的计算过程**
- 19.13 **离散相的后处理**

19.1 离散相模型概览与其应用范围

- 19.1.1 简介
- 19.1.2 湍流中的颗粒处理方法
- 19.1.3 应用范围
- 19.1.4 离散相模型的求解过程概述

19.1.1 简介

除了求解连续相的输运方程，FLUENT 也可以在拉氏坐标下模拟流场中离散的第二相。由球形颗粒（代表液滴或气泡）构成的第二相分布在连续相中。FLUENT 可以计算这些颗粒的轨道以及由颗粒引起的热量/质量传递。相间耦合以及耦合结果对离散相轨道、连续相流动的影响均可考虑进去。

FLUENT 提供的离散相模型选择如下：

- 对稳态与非稳态流动，可以应用拉氏公式考虑离散相的惯性、曳力、重力
- 预报连续相中，由于湍流涡旋的作用而对颗粒造成的影响
- 离散相的加热/冷却
- 液滴的蒸发与沸腾
- 颗粒燃烧模型，包括挥发份析出以及焦炭燃烧模型（因而可以模拟煤粉燃烧）
- 连续相与离散相间的耦合
- 液滴的迸裂与合并

应用这些模型，FLUENT 可以模拟各种涉及离散相的问题，诸如：颗粒分离与分级、喷雾干燥、气溶胶扩散过程、液体中气泡的搅浑、液体燃料的燃烧以及煤粉燃烧。19.2-19.5 介绍离散相计算中所用到的物理方程；设定、求解和后处理在 19.6-19.13 中介绍。

19.1.2 湍流中的颗粒

随机轨道模型或颗粒群模型（19.2.2）可考虑颗粒湍流扩散的影响。在随机轨道模型中，通过应用随机方法（19.2.2）来考虑瞬时湍流速度对颗粒轨道的影响。而颗粒群模型则是跟踪由统计平均决定的一个“平均”轨道（19.2.2)。颗粒群中的颗粒浓度分布假设服从高斯概率分布函数（PDF)。两种模型中，颗粒对连续相湍流的生成与耗散均没有直接影响。

19.1.3 应用范围

颗粒体积分数的适用范围

FLUENT 中的离散相模型假定第二相（分散相）非常稀薄，因而颗粒-颗粒之间的相互作用、颗粒体积分数对连续相的影响均未加以考虑。这种假定意味着分散相的体积分数必然很低，一般说来要小于 10-12%。但颗粒质量承载率可以大于 10-12%，即用户可以模拟分散相质量流率等/大于连续相的流动。参阅第十八、二十章来确定具体多相流问题中的适用模型。

模拟连续相中悬浮颗粒的限制

稳态拉氏离散相模型适用于具有确切定义的入口与出口边界条件问题，不适用于模拟在连续相中无限期悬浮的颗粒流问题，这类问题经常出现在处理封闭体系中的悬浮颗粒过程中，包括：搅拌釜、混合器、流化床。但是，非稳态颗粒离散相模型可以处理此类问题。参阅第十八、二十章来确定具体多相流问题中的适用模型。

在 FLUENT 的其它模型中应用离散相模型的限制

一旦使用了离散相模型，下面的模型将不能使用：

- 选择了离散相模型后，不能再使用周期性边界条件（无论是质量流率还是压差边界

条件）

- 可调整时间步长方法不能与离散相模型同时使用
- 预混燃烧模型中只能使用非反应颗粒模型
- 同时选择了多参考坐标系与离散相颗粒模型时，在缺省情况下，颗粒轨道的显示失却了其原有意义；同样，相间耦合计算是没有意义的。

在多参考坐标系下跟踪颗粒以及计算相间耦合的解决办法是选择基于流体的绝对速度而不是相对速度。相应的调整如下：在文本命令窗口下 `define/models/dpm/tracking/track-in- absolute-frame`。应该指出的是，在基于绝对速度跟踪颗粒时，可能引起不合理的颗粒-壁面相互作用。

颗粒的喷入速度（在 Set Injection Properties 面板里设定）是基于参考坐标而定义的，因而，颗粒的跟踪也是基于这个设定的坐标。缺省情况下，颗粒的喷入速度是基于当地坐标系。如果你激活了 track-in-absolute-frame 选项，那么，其喷入速度将会是基于绝对坐标系定义的速度。

19.1.4 离散相模型的求解过程概述

在 FLUENT 模型中，你可以通过定义颗粒的初始位置、速度、尺寸以及每个（种）颗粒的温度来使用此模型。依据对颗粒物理属性的定义而确定的颗粒初始条件可以用来初始化颗粒的轨道和传热／质计算。当颗粒穿过流体运动时，颗粒的轨道以及传热量、传质量可通过当地流体作用于颗粒上的各种平衡作用力、对流／辐射引起的热量／质量传递来进行计算。可通过图形化界面或文本界面输出计算出的颗粒轨道以及相应的传热／质量。

既可以通过在一个固定的流场中（非耦合方法）来预测离散相的分布，也可以在考虑离散相对连续相有影响的流场（相间耦合方法）中考察颗粒的分布。相间耦合计算中，离散相的存在影响了连续相的流场，而连续相的流场反过来又影响了离散相的分布。可以交替计算连续相和离散相直到两相的计算结果都达到收敛标准。细节请参阅 19.5。

稳态问题的求解步骤

稳态离散相问题的设定、求解的一般过程如下：

1 求解连续相流场

2 创建离散相喷射源(射流源)

3 求解耦合流动（如果希望计算的话）

4 用 PLOT 或 REPORT 图形界面来跟踪离散相

非稳态问题的求解步骤

非稳态离散相问题的设定、求解的一般过程如下：

1 创建离散相喷射入口

2 初始化流场

3 设定求解的时间步长和时间步数。在每个时间步，颗粒的位置将得到更新。如果求解问题是非耦合流动，那么，颗粒的位置在每个时间步计算完成之后得到更新的；如果是耦合流动，那么，颗粒的位置在每个时间步内的相间耦合迭代计算过程中都会得到更新。

19.2 轨道的计算

- 19.2.1 颗粒运动方程
- 19.2.2 颗粒湍流扩散
- 19.2.3 颗粒磨蚀与沉积

19.2.1 颗粒运动方程

颗粒的力平衡

FLUENT 中通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒（液滴或气泡）的轨道。颗粒的作用力平衡方程（颗粒惯性＝作用在颗粒上的各种力）在笛卡尔坐标系下的形式（x 方向）为：

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(r_p - r)}{r_p} + F_x \qquad (19.2.1)$$

其中 $F_D(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力，其中

$$F_D = \frac{18m}{r_p d_p^2}\frac{C_D \mathrm{Re}}{24} \qquad (19.2.2)$$

其中，u 为流体相速度，u_p 为颗粒速度，m 为流体动力粘度，r 为流体密度，r_p 为颗粒密度（骨架密度），d_p 为颗粒直径，Re 为相对雷诺数（颗粒雷诺数），其定义为：

$$\mathrm{Re} \equiv \frac{r d_p |u_p - u|}{m} \qquad (19.2.3)$$

曳力系数 C_D 可采用如下的表达式：

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\mathrm{Re}} + \frac{a_2}{\mathrm{Re}} \qquad (19.2.4)$$

对于球形颗粒，在一定的雷诺数范围内，上式中的 a_1, a_2, a_3 为常数［Morsi and Alexander [163]]。C_D 也可采用如下的表达式：

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}}(1 + b_1 \mathrm{Re}^{b_2}) + \frac{b_3 \mathrm{Re}}{b_4 + \mathrm{Re}} \qquad (19.2.5)$$

其中；

$$\begin{aligned} b_1 &= \exp(2.3288 - 6.4581 + 2.4486 f^2) \\ b_2 &= 0.0964 + 0.5565 f \\ b_3 &= \exp(4.905 - 13.8944 f + 18.4222 f^2 - 10.2599 f^3) \\ b_4 &= \exp(1.4681 + 12.2584 f - 20.7322 f^2 + 15.8855 f^3) \end{aligned} \qquad (19.2.6)$$

上式是由 Haider and Levenspiel [85]得到的。形状系数 f 的定义如下：

$$f = \frac{s}{S} \qquad (19.2.7)$$

其中 s 为与实际颗粒具有相同体积的球形颗粒的表面积，S 为实际颗粒的表面积。(索太尔中径 S_{32})。

对于亚观尺度（直径＝１～１０微米）的颗粒，Stokes'曳力公式[170]是适用的。这种情况下，F_D 定义为：

$$F_D = \frac{18m}{d_p^2 r_p C_c} \qquad (19.2.8)$$

上式中的系数 C_c 为 Stokes'曳力公式的 Cunningham 修正（考虑稀薄气体力学的颗粒壁面速度滑移的修正），其计算公式为：

$$C_c = 1 + \frac{2l}{d_p}(1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2l)}) \qquad (19.2.9)$$

其中 l 为气体分子平均自由程。

FLUENT 中也包含有大马赫数流动时的颗粒曳力公式。这个曳力公式的形式与球形颗粒的相应表达式（方程 19.2-4）类似，但包含了部分修正[38]以适应颗粒马赫数大于 0.4 或颗粒雷诺数大于 20 的流动。

对于涉及到离散相液滴迸裂的非稳态流动模型，可以使用动态曳力公式模型。关于这个模型公式的详细介绍请参阅 19.4.4。

关于如何选择各种曳力模型请参阅 19.7.7。

考虑重力的影响

尽管方程 19.2-1 包含有重力的影响，在 FLUENT 的缺省模式下，重力加速度等于零。如果要考虑重力的影响，必须在 Operating Conditions 面板中设定重力加速度的大小和方向。

其它作用力

颗粒平衡方程 19.2-1 中包含的其它作用力 F_x 在某些情况下可能很重要。这些“其它”作用力中的最重要的一项是所谓的“视质量力”（附加质量力）。它是由于要使颗粒周围流体加速而引起的附加作用力。视质量力的表达式为：

$$F_x = \frac{1}{2}\frac{r}{r_p}\frac{d}{dt}(u - u_p) \qquad (19.2.10)$$

当 $r > r_p$ 时，视质量力不容忽视。流场中存在的流体压力梯度引起的附加作用力为：

$$F_x = \left(\frac{r}{r_p}\right) u_p \frac{\partial u}{\partial x} \qquad (19.2.11)$$

旋转参考坐标系下颗粒受到的作用力

颗粒平衡方程 19.2-1 中的其它作用力 F_x 还包括由于参考坐标系的旋转引起的作用力。当模拟旋转参考坐标系下的流动时（参阅 9.2）就会引起附加作用力。例如，当定义了围绕 z 轴旋转速度的时候，在笛卡尔坐标系下，x 和 y 轴方向的附加作用力为：

$$\left(1 - \frac{r}{r_p}\right)\Omega^2 x + 2\Omega\left(u_{y,p} - \frac{r}{r_p}u_y\right) \qquad (19.2.12)$$

其中 $u_{y,p}$ 和 u_y 分别是颗粒与流体在 y 轴方向的速度。

$$\left(1-\frac{r}{r_p}\right)\Omega^2 y+2\Omega\left(u_{x,p}-\frac{r}{r_p}u_x\right) \qquad (19.2.13)$$

其中$u_{x,p}$和u_x分别是颗粒与流体在 x 轴方向的速度。

热泳力（热致迁移力或辐射力）

对于悬浮在具有温度梯度的气体流场中的颗粒，受到一个与温度梯度相反的作用力。这种现象被称为热泳。颗粒平衡方程 19.2-1 中的其它作用力F_x可包含这种热泳力：

$$F_x=-D_{T,p}\frac{1}{m_pT}\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (19.2.14)$$

其中$D_{T,p}$为热泳力系数。可以定义为常数、多项表达式或用户定义函数。也可以采用 Talbot [237]得到的表达式：

$$F_x=-\frac{6\pi d_p m^2 C_s(K+C_t Kn)}{r(1+3C_m Kn)(1+2K+2C_t Kn)}\frac{1}{m_pT}\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (19.2.15)$$

其中：

$Kn = Knudsen数 = 2\,l/d_p$

l = 气体平均分子自由程

$K = k/k_p$

k = 基于气体平动动能的气体热导热率 = $(15/4)\ mR$

k_p = 颗粒导热率

$C_S = 1.17$

$C_t = 2.18$

$C_m = 1.14$

m_p = 颗粒质量

T = 当地流体温度

m = 气体动力粘度

上面的公式均假定颗粒为球形，气体为理想气体。

布朗力

对于亚观粒子，附加作用力可包括布朗力。布朗力的分量可由高斯白噪声过程来模拟，其

谱密度 $S_{n,ij}$ 由文献[135]给出：

$$S_{n.ij} = S_0 d_{ij} \qquad (19.2.16)$$

其中 d_{ij} 为克罗内克尔（符号）d 函数。

$$S_0 = \frac{216 u s T}{p^2 r d_p^5 \left(\frac{r_p}{r}\right)^2 C_c} \qquad (19.2.17)$$

T 为气体的绝对温度，u 为气体的运动粘度，s 为 Stefan-Boltzmann 常数。布朗力分量幅值为：

$$F_{b_i} = V_i \sqrt{\frac{p S_0}{\Delta t}} \qquad (19.2.18)$$

其中 V_i 为期望为 0、方差为 1 的独立高斯概率分布（正态分布）随机数。在每一个时间步，布朗力分量幅值都要重新进行计算。为考虑布朗力的影响，必须要激活能量方程选项。只有选择了非湍流模型才能激活布朗力选项。

Saffman 升力

在附加力中也可以考虑由于横向速度梯度（剪切层流动）引致的 Saffman 升力。这里使用的表达式是由 Li 和 Ahmadi [135]提出的，Saffman [196]给出了这种升力的一般表达式：

$$\vec{F} = \frac{2 K u^{1/2} r d_{ij}}{r_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{1/4}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \qquad (19.2.19)$$

其中 $K = 2.594$，d_{ij} 为流体变形速率张量。这个升力表达式仅对较小的颗粒雷诺数流动适用。并且，基于颗粒-流体速度差的颗粒雷诺数必须要小于基于剪切层（厚度）的颗粒雷诺数的平方根（$\mathrm{Re}_p \equiv \frac{r d_p |u - u_p|}{m} < \sqrt{\mathrm{Re}_p} \equiv \sqrt{\frac{r l |u - u_p|}{m}}$）。由于这种条件仅对亚观颗粒才有效，所以，我们建议只在处理亚观尺寸颗粒的问题时考虑 Saffman 升力。

湍流流动中颗粒的随机轨道跟踪

当流动状态为湍流时，FLUENT 使用流体的时均速度 $\bar{u}$，通过轨迹方程（方程 19.2-1）来计算颗粒的轨道。用户还可以通过考虑流体速度脉动引致的瞬时速度

$$u = \bar{u} + u' \qquad (19.2.20)$$

来计算由于流体湍流引致的颗粒扩散。FLUENT 采用随机的方法（随机游走模型）来确定流体的瞬时速度。细节请参阅 19.2.2。

湍流流动的颗粒群跟踪

流体湍流脉动引起的颗粒扩散也可以通过颗粒群模型[14, 15, 99, 141]模拟。通过应用随机的方法来计算围绕颗粒群平均轨道的颗粒扩散。与之相应的颗粒浓度则是通过高斯概率密度函数（PDF）来表示，流体湍流脉动引起的颗粒扩散决定了概率密度函数的方差。对颗粒运动取系综平均（此平均值代表了颗粒群的运动），然后就得到关于这个系综平均的颗粒群方程，求解这个方程就可以获得颗粒群的平均轨道（参阅 19.2.2）。（参阅周立行）

轨道方程的积分

颗粒轨迹方程以及描述颗粒质量/热量传递的附加方程都是在离散的时间步长上逐步进行积分运算求解的。对方程 19.2-1 积分就得到了颗粒轨道上每一个位置上的颗粒速度。颗粒轨道通过下式可以得到：

$$\frac{dx}{dt}=u_p \qquad (19.2.21)$$

这个方程与 19.2-1 相似，沿着每个坐标方向求解此方程就得到了离散相的轨迹。

假设在每一个小的实际间隔内，包含体力在内的各项均保持为常量，颗粒的轨道方程可以简写为:

$$\frac{du_p}{dt}=\frac{1}{t_p}\left(u-u_p\right) \qquad (19.2.22)$$

其中 t_p 为颗粒松弛时间。FLUENT 应用梯形差分格式对方程 19.2-22 积分：

$$\frac{u_p^{n+1}-u_p^n}{\Delta t}=\frac{1}{t}(u^*-u_p^{p+1})+\ldots \qquad (19.2.23)$$

其中，n 代表第 n 次迭代步，并且有

$$u^*=\frac{1}{2}\left(u^n+u^{n+1}\right) \qquad (19.2.24)$$

$$u^{n+1}=u^n+\Delta t u_p^n\cdot\nabla u^n \qquad (19.2.25)$$

在一个给定的时刻，同时求解方程 19.2-21 和 19.2-22 以确定颗粒的速度与位置。对于旋转参考坐标系，积分过程是在旋转参考坐标系内进行的，运动体系的旋转作用是通过在上述方程（方程 19.2-12 和 19.2-13）中添加附加作用项来加以考虑。无论在那种情况下，必须要注意积分时间步必须足够小以使得颗粒轨道的积分计算更精确。（稳定的判别标准？）

颗粒尺寸分布

对于液体喷雾来说，颗粒尺寸的典型分布是 Rosin-Rammler 分布。颗粒的全部尺寸被分成足够多的尺寸组；每个尺寸组由一个平均粒径来表示，颗粒的轨道就依据此代表粒径来计算。大于粒径 d 的颗粒质量分数为：

$$Y_d=e^{-(d/\bar{d})^n} \qquad (19.2.26)$$

其中 $\bar{d}$ 为尺寸分布的中位径，n 为颗粒尺寸分布指数。Rosin-Rammler 分布的详细介绍请参阅 19.9.7。

离散相边界条件

当颗粒与壁面发生碰撞时，将会发生下述几种情况：

- 颗粒发生弹性或非弹性碰撞反射
- 穿过壁面而逃逸（颗粒的轨道计算在此处终止）
- 在壁面处被捕集。非挥发性颗粒在此处终止计算；颗粒或液滴中的挥发性物质在此处被释放到气相中
- 穿过内部的诸如辐射或多孔介质间断面区域

用户也可以通过用户定义函数来模拟颗粒轨迹。关于用户定义函数的细节请参阅 19.10。

19.2.2 颗粒的湍流扩散

颗粒的湍流扩散既可以通过随机轨道模型，也可以通过代表一定颗粒尺寸组的颗粒群模型来加以模拟。另外，这些模型也可以同时使用来模拟考虑了流体相速度脉动的多组"颗粒群"。

!! 如果选择了 Spalart-Allmaras 湍流模型，那么，轨道计算中就不能包含颗粒的湍流扩散。

随机轨道模型

在随机轨道模型中，沿着颗粒轨道，FLUENT 在积分计算过程中，颗粒轨道方程中的流体速度为瞬时速度 $\bar{u} + u'(t)$，这样，就可以考虑颗粒的湍流扩散。通过这种方法计算足够多的代表性颗粒的轨迹（即"number of tries"），湍流对颗粒的随机性影响就可以得到考虑。FLUENT 使用了离散随机游走模型。在此种模型中，假定流体的脉动速度是关于时间的分段常量函数。在流体涡的特征生存时间间隔内，这个速度脉动保持为常量。

在由各向异性扩散占主导地位的流动中，小颗粒应该具有均匀分布的特征，但随机游走模型得到的解在物理上却是不真实的；与之相反，随机游走模型的计算结果显示出颗粒在低湍流区域浓集。

积分时间

颗粒湍流扩散的计算应用了积分时间尺度 T 的概念，T 表示的是颗粒沿着其运动轨迹 ds 处于湍流运动状态所经历的时间：

$$T = \int_0^\infty \frac{u_p' u_p'(t+s)}{\overline{(u_p')^2}} ds \qquad (19.2.27)$$

积分时间与颗粒的湍流扩散率正比，T 值越大就表明颗粒在流动过程中处于湍流状态时间越长。由上式可知颗粒的湍流扩散率可写作 $\overline{u_i' u_j'} T$。

对于在流动区域中具有良好跟踪性（相间滑移速度接近于零）的细小颗粒，，颗粒的积分时间尺度就变为流体的拉格朗日积分时间尺度 T_L，可近似为：

$$T_L = C_L \frac{k}{e} \qquad (19.2.28)$$

其中 C_L 是未知量，并且难以确定。通过比较具有良好跟踪性能颗粒的扩散率 $\overline{u_i' u_j'} T$ 和由湍流模型计算得到的标量扩散率 u_t/s，对于 $k-e$ 模型以及由其衍生的各种湍流模型，我们就得到：

$$T_L \approx 0.15 \frac{k}{e} \qquad (19.2.29)$$

对于雷诺应力模型[48]，

$$T_L \approx 0.30 \frac{k}{e} \qquad (19.2.30)$$

对于 $k-w$ 模型，把 $w = e/k$ 代入方程 19.2-28 即可；对于大涡模型，T_L 取为大涡的时间尺度。

随机游走模型（Discrete Random Walk (DRW)）

随机游走模型（或涡团生存期模型）考虑了颗粒与流体的离散涡（连续不断的的生成-消亡）之间的相互作用。每个涡团的特征由下面的量来体现：

- 满足高斯概率密度分布函数的随机脉动速度u'、v'、w'
- 时间尺度t_e

对湍流涡团中流体脉动速度u'、v'、w'（假定其满足高斯概率密度分布）采样，有：

$$u' = V\sqrt{\overline{(u')^2}} \qquad (19.2.31)$$

其中V为服从正态分布的随机数，方程右边带根号的量为当地速度脉动的雷诺应力。此时，流场中每一处的湍动能都是已知量，对于$k-e$，$k-w$以及其相应衍生模型，雷诺应力分量（假定当地湍流各向同性）为：

$$\sqrt{\overline{(u')^2}} = \sqrt{\overline{(v')^2}} = \sqrt{\overline{(w')^2}} = \sqrt{2k/3} \qquad (19.2.32)$$

对于雷诺应力模型，脉动速度的推导过程考虑了雷诺应力的各向异性特征，有：

$$u' = V\sqrt{\overline{(u')^2}} \qquad (19.2.33)$$

$$v' = V\sqrt{\overline{(v')^2}} \qquad (19.2.34)$$

$$w' = V\sqrt{\overline{(w')^2}} \qquad (19.2.35)$$

此时，在某个参考坐标系下（主轴坐标系），湍流的二阶矩为对角阵（3*3）。对于大涡模型，速度脉动在各个方向上相同，细节请参阅 10.7.3。

涡团的特征生存时间可定义为常量：

$$t_e = 2T_L \qquad (19.2.36)$$

其中T_L的一般表达式由方程 19.2-28 给出（方程 19.2-29 为缺省情况下的表达式），生存时间也可以定义为关于T_L的变量：

$$t_e = -T_L \log(r) \qquad (19.2.37)$$

其中r为服从在（0，1）区间均匀分布的随机数，T_L由方程 19.2-29 给出。应用这个随机函数得到的结果更接近实际情况。颗粒穿过流体涡团的时间定义为：

$$t_{cross} = -t \ln\left[1-\left(\frac{L_e}{t\left|u-u_p\right|}\right)\right] \qquad (19.2.38)$$

其中t为颗粒松弛时间，L_e为涡团长度标尺，$\left|u-u_p\right|$为颗粒与流体的速度差。

颗粒与流体间的相互作用时间取为涡团生存时间和颗粒穿过涡团时间两者的较小值。当时间达到这个较小的时间值时，由方程 19.2-31 又重新得到了一个瞬时速度。

使用随机游走模型

对于随机游走模型来说，只需要确定积分时间尺度常数C_L（参阅方程 19.2-28、19.2-36）和选择何种方式来计算涡团的生存时间。对于每个颗粒喷射源，用户可在 Set Injection Properties 面板里选择使用常量或随机生成方法来确定涡团的生存时间。

!! 如果选择了 Spalart-Allmaras 湍流模型，那么，计算中就不能包含颗粒的湍流扩散。

颗粒群(颗粒云)模型

颗粒群模型是基于由 Litchford、Jeng [141]， Baxter、Smith [15]，Jain [99]等人提出的颗粒随机输运模型。这个模型运用统计方法来跟踪颗粒围绕某一平均轨道的湍流扩散。通过计算颗粒的系综平均运动方程得到颗粒的某个"平均轨道"。颗粒群以点源形式或以一个初始直径状态进入流动区域。当其穿过流动区域时，颗粒群由于湍流扩散作用而发生膨胀。颗粒在此颗粒群的位置由概率密度函数确定，而概率密度函数的期望值正处于颗粒群轨道的中心。

由停留时间 t 和位置 x_i 两个参数确定的概率密度函数表示在颗粒群内存在颗粒的概率。（相当于一个相空间， $d\vec{x}, dt$ ）这个概率乘以颗粒群代表的颗粒质量流率 $\dot{m}$ 就得到了颗粒的平均数密度。（周力行）

$$\langle n(x_i)\rangle = \dot{m}\, P(x_i, t) \qquad (19.2.39)$$

关于颗粒位置的概率密度函数假定服从多维高斯分布。那么，其数学特征完全由其期望 m_i 和方差 s_i^2 所确定，，其表达式为：

$$P(x_i, t) = \frac{1}{(8p)^{3/2}\prod_{i=1}^{3} s_i} e^{-(s^2/2)} \qquad (19.2.40)$$

其中

$$s = \sum_{i=1}^{3} \frac{x_i - m_i}{s_i} \qquad (19.2.41)$$

在一个确定的时刻，概率密度函数的均值（或颗粒群中心）代表了颗粒在颗粒群中的最可几位置。通过对由颗粒群运动方程定义的颗粒速度的积分就获得了颗粒的平均位置（最可几位置）：

$$m_i(t) \equiv \langle x_i(t)\rangle = \int_0^t \langle V_i(t_1)\rangle dt_1 + \langle x_i(0)\rangle \qquad (19.2.42)$$

颗粒群的运动方程是通过系综平均的方法获得的。

概率密度函数的方差确定了颗粒群的半径。这个方差 $s_i^2(t)$ 可表示成两个湍流统计量的函数：

$$s_i^2(t) = 2\int_0^t \left\langle [u'_{p,i}(t_2)]^2 \right\rangle \int_0^{t_2} R_{p,ii}(t_2, t_1)\, dt_1 dt_2 \qquad (19.2.43)$$

其中 $\left\langle [u'_{p,i}(t_2)]^2 \right\rangle$ 为速度脉动均方值， $R_{p,ii}(t_2, t_1)$ 为颗粒脉动速度相关函数：

$$R_{p,ii}(t_2, t_1) = \frac{\left\langle u'_{p,i}(t_2) u'_{p,j}(t_1)\right\rangle}{\left[\left\langle u'^2_{p,i}(t_2) u'^2_{p,j}(t_2)\right\rangle\right]^{1/2}} \qquad (19.2.44)$$

把 $t = |t_2 - t_1|$ 代入，并且有：

$$R_{p,ij}(t_2,t_1)=R_{p,ij}(t_4,t_3) \qquad (19.2.45)$$

若$|t_2-t_1|=|t_4-t_3|$，可得：

$$s_i^2(t)=2\int_0^t\langle u_{p,i}'^2(t_2)\rangle\int_0^{t2}R_{p,ii}(t)dt\,dt_2 \qquad (19.2.46)$$

上式中，忽略了协方差的非自相关的部分（$R_{p,ij},i\neq j$）。

颗粒速度之间的相关函数决定了颗粒在颗粒群中的扩散性质。FLUENT 中使用的相关函数首先是由 Wang [254]提出，Jain [99]第一个应用了此模型。当重力方向沿着 y 轴时，R_{ij} 为：

$$R_{p,11}=\frac{u_p'^2}{q}e^{-(t/t_a)}St_T\left(B-0.5m_Tg\frac{St_T^2B^2+1}{q}\right)+\frac{u'^2}{q}e^{-(tB/T)}\left(-1+\frac{m_TSt_T^2gB}{q}+0.5m_Tg\frac{t}{T}\right)$$
(19.2.47)

$$R_{p,22}=R_{p,11} \qquad (19.2.48)$$

$$R_{p,33}=\frac{u'^2St_TB}{q}e^{-(t/t_a)}-\frac{u'^2}{q}e^{-(tB/T)} \qquad (19.2.49)$$

其中$B=\sqrt{1+m_T^2g^2}$，t_a为颗粒松弛时间：

$$t_a=\frac{r_pd_p^2}{18m} \qquad (19.2.50)$$

并且有：

$$T=\frac{m_TT_{mE}}{m} \qquad (19.2.51)$$

$$T_{fE}=\frac{C_m^{3/4}k^{3/2}}{e\left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2}} \qquad (19.2.52)$$

$$g=\frac{t_ag}{u'} \qquad (19.2.53)$$

$$St=\frac{t_a}{T_{mE}} \qquad (19.2.54)$$

$$St_T=\frac{t_a}{T} \qquad (19.2.55)$$

$$q=St_T^2(1+m_T^2g^2)-1 \qquad (19.2.56)$$

$$m=\frac{\overline{u}}{u'} \qquad (19.2.57)$$

$$T_{mE} = T_{fE}\frac{\overline{u}}{u'} \qquad (19.2.58)$$

$$m_T = m\left[1-\frac{G(m)}{(1+St)^{0.4(1+0.01St)}}\right] \qquad (19.2.59)$$

$$G(m)=\frac{2}{\sqrt{p}}\int_0^{\infty}\frac{e^{-y^2}dy}{\left(1+\frac{m^2}{p}\left(\sqrt{p}\,erf(y)y-1+e^{-y^2}\right)\right)^{5/2}} \qquad (19.2.60)$$

使用上述的相关函数，在颗粒群的所有停留（生存）时间内对时间项进行积分，那么，在确定的时刻，颗粒群的半径由三个坐标方向（x,y,z）的标准差确定，其置信度（置信水平）为 99.2%。一旦确定了颗粒群所涵盖的计算网格后，在这些网格上的流体物性将取关于平均颗粒轨道的系综平均，而颗粒的平均轨迹则通过对时间的积分得到。在计算过程中，对应每个计算网格，都要取一个加权系数，其定义为：

$$W(x_i,t)\equiv\frac{\int_{V_{cell}}P(x_i,t)dV}{\int_{V_{clound}}P(x_i,t)dV} \qquad (19.2.61)$$

如果进行相间耦合计算，那么，对于处在颗粒群内的流体相来说，(其差分方程）都要添加一个基于上面定义的加权系数的源相。

使用颗粒群模型

颗粒群模型所要求的输入参数只有两项：最小与最大颗粒群半径。对于颗粒喷射源，颗粒群模型的选取在 Set Injection Properties 面板里进行。细节请参阅 19.9.15。

!! 对于非稳态颗粒流动，不能应用颗粒群模型。

19.2.3 颗粒磨蚀与沉积

在所有的壁面均可以监视颗粒的磨蚀与沉积情况。磨蚀速率定义为：

$$R_{erosion}=\sum_{p=1}^{N_{particles}}\frac{\dot{m}_p C(d_p) f(a) v^{b(v)}}{A_{face}} \qquad (19.2.62)$$

其中 $C(d_p)$ 为颗粒直径的函数，a 为颗粒对壁面的冲击角（侵入角），$f(a)$ 为侵入角的函数，v 是颗粒相对于壁面的速度，$b(v)$ 是此相对速度的函数。缺省情况下，$C=1, f=1, b=0$。

由于 C, f, b 均定义为壁面处的边界条件，而不是某种颗粒的介质属性，所以，其缺省值不会随着颗粒材料的不同而有所变化，(因而反映不出颗粒材料的差异引起的壁面磨蚀的不同)。对于沙砾-碳钢，沙砾-铝材的磨蚀性能函数请参阅 Edwards et al. [60]。

需要注意的是上述的公式得到的材质的磨蚀速率是无量纲化的，所以这就提供了很大的方便。选取适当的函数 C, f 就可以考虑到壁面材质密度，并得到以长度/时间（例如 mm/年）为单位的磨蚀速率。当使用 C, f 的缺省值时，磨蚀速率的单位是：磨蚀掉的材质质量/（面

积*时间)。
还需要注意的是只有选择两相耦合计算，才可以得到颗粒的磨蚀/沉积状况。
颗粒的沉积速率定义为：

$$R_{accretion}=\sum_{p=1}^{N_{particles}}\frac{\dot{m}_p}{A_{face}} \qquad (19.2.63)$$

19.3 传热、传质计算

FLUENT 的离散相模型可以计算有反应的颗粒或液滴及其对流体相的影响。FLUENT 提供了数种传热/传质的关联定律，这些定律所使用的物理模型如下。

19.3.1 FLUENT 中的颗粒类型
19.3.2 定律 1/定律 6：惯性颗粒的加热与冷却
19.3.3 定律 2：液滴蒸发
19.3.4 定律 3：液滴沸腾
19.3.5 定律 4：挥发份析出
19.3.6 定律 5：表面燃烧
19.3.7 在一般异相表面反应中使用燃烧颗粒模型

19.3.1 FLUENT 中的颗粒类型

依据定义的颗粒类型，用户可以激活不同的颗粒适用定律。在 Set Injection Properties 面板里，一旦选择了特定的颗粒类型，FLUENT 将会选择与之相匹配的适用定律。所有不同类型的颗粒都具有一个预先设定好的适用定律范围：

颗粒类型	特征	适用定律类型
惯性颗粒	惯性颗粒的加热与冷却	1，6
液滴	加热/蒸发/沸腾	1，2，3，6
燃烧（颗粒）	加热 挥发份析出/颗粒膨胀 异相表面反应	1，4，5，6

除了上面论及的定律，用户可以通过用户定义函数来定义不同的定律形式。
用户可在 Set Injection Properties 面板里选择 Wet Combustion 来扩展燃烧颗粒的适用定律范围以考虑颗粒的蒸发/沸腾。
上表中所列的物理定律（定律 1-6），阐释了颗粒的传热、传质规律，其细节请参阅 19.3.2-19.3.6。

19.3.2 定律 1/定律 6：惯性颗粒的加热与冷却

当颗粒温度低于用户定义的蒸发温度 T_{vap}，或颗粒内的挥发份 $f_{v,o}$ 已全部析出时，就可以使用适用惯性颗粒的加热或冷却定律（定律 1 和 6）。这种情况下，有：

定律 1：

$$T_p < T_{vap} \qquad (19.3.1)$$

定律 6：

$$m_p \le (1-f_{v,0})m_{p,0} \qquad (19.3.2)$$

其中，T_p 为颗粒温度，$m_{p,0}$ 为颗粒初始质量，m_p 为颗粒当前质量。

颗粒温度只要低于其蒸发温度，定律 1 总是适用的。处于蒸发温度时，颗粒所遵从的定律将转变为非惯性颗粒所遵从的定律（2,3,4 或 5）；一旦颗粒／液滴的挥发份消耗完之后，颗粒将遵循定律 6（需要注意的是，蒸发温度 T_{vap} 定义了发生蒸发／沸腾／挥发份析出时的起始温度，因此只是一个由用户定义的模型中的某个门槛值）。

当使用定律 1 或定律 6 时，FLUENT 使用一个简单的热平衡方程来关联颗粒温度 $T_p(t)$ 与颗粒表面的对流与辐射传热：

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + e_p A_p s(q_R^4 - T_p^4) \qquad (19.3.3)$$

其中：

m_p ＝颗粒质量（kg）

c_p ＝颗粒比热(J/kg-K)

A_p ＝颗粒表面积(m^2)

T_∞ ＝连续相的当地温度(K)

h ＝对流给（传）热系数(W/m^2-K)

e_p ＝颗粒黑度（辐射率）(无量纲)

s ＝斯蒂芬孙－玻耳兹曼常数（5.67*10^{-8}W/m^{2-}K^4）

q_R ＝辐射温度，$\left(\frac{G}{4s}\right)^{1/4}$

方程 19.3-3 假定颗粒内部的热阻为零，即，颗粒自身的温度处处一致。
G 为入射辐射，单位是 W/m^2：

$$G = \int_{\Omega=4p} I d\Omega \qquad (19.3.4)$$

其中 I 为辐射强度，Ω 为空间立体角。如果使用了 P-1 或离散转移辐射模型，并且在 **Particle Radiation Interaction** 面板中激活了颗粒辐射热传选项，就可以计算颗粒的辐射传热。
对方程 19.3-3 进行关于时间的积分，其中，假设颗粒温度在连续的积分时间内近似线性变化，有：

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_{p[}\left\{-\left[h + e_p s T_p^3\right]T_p + \left[hT_\infty + e_p s q_R^4\right]\right\} \qquad (19.3.5)$$

在计算颗粒轨道的过程中，FLUENT 对方程 19.3-5 进行积分，得到下一时刻的颗粒温度，有：

$$T_p(t+\Delta t) = a_p + \left[T_p(t) - a_p\right]e^{-b_p \Delta t} \qquad (19.3.6)$$

其中，Δt 为积分时间步长，并且有：

$$a_p = \frac{hT_\infty + e_p s q_R^4}{h + e_p s T_p^3(t)} \qquad (19.3.7)$$

以及：

$$b_p = \frac{A_p\left(h + e_p s T_p^3(t)\right)}{m_p c_p} \qquad (19.3.8)$$

对于方程 19.3-5，如果考虑传质问题，那么，FLUENT 可以用一个刚性方程组求解器来计算颗粒传热与传质耦合问题。细节请参阅 19.7.3。

对流给热系数 h 采用的是 Ranz and Marshall [185, 186]的建议值：

$$Nu = \frac{hd_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6\,\mathrm{Re}_d^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \qquad (19.3.9)$$

其中：

d_p ＝颗粒直径（m）

k_∞ ＝连续相的导热系数（W/m-k）

Re_d ＝以颗粒直径为定性尺寸、颗粒与流体的速度差（方程 19.2-3）定义的雷诺数

Pr ＝连续相的普朗特数（$c_p m / k_\infty$ ）

当颗粒穿过流体单元（计算网格）时，颗粒吸收（释放）的热量作为源相作用到连续相的能量方程中。而应用定律 1 和 6 时，颗粒／液滴与流体之间没有质量交换，与此同时，颗粒也不参与任何反应过程。

19.3.3 定律 2：液滴蒸发

定律 2 可用来计算离散相中液滴的蒸发。当液滴温度达到蒸发温度 T_{vap} 时，定律 2 开始生效，并一直保持到颗粒温度到达液滴的沸腾温度 T_{bp} 或者到液滴的挥发份全部析出才会停止使用：

$$T_p < T_{bp} \qquad (19.3.10)$$

$$m_p > (1 - f_{v,0}) m_{p,0} \qquad (19.3.11)$$

蒸发定律适用的起始温度由设定的温度 T_{vap} 所决定。作为一个设定值，T_{vap} 并没有其它的物理涵义。需要注意的是，一旦液滴的蒸发开始（液滴温度达到了门槛值）之后，即使颗粒的温度又低于 T_{vap} ，在计算中仍然使用这个定律。只有液滴的温度低于露点温度时，蒸发才会停止。在这种情况下（$T_p < T_{vap}$ ），虽然仍在使用定律 2，但并不计算蒸发过程。当颗粒温度达到沸点温度的时候，液滴的蒸发率转由实际的沸腾速率（定律 3，细节请参阅 19.3.4）确定。

使用定律 2 时的传质

在定律 2 所适用的情况下，液滴的蒸发量由梯度扩散确定，即，从液滴向气相中的扩散率与液滴与气流主流之间的蒸汽浓度梯度相关联：

$$N_i = k_i\left(C_{i,s} - C_{i,\infty}\right) \qquad (19.3.12)$$

其中：

N_i ＝**蒸汽的摩尔流率**（kg-mol/m^2-s）

k_c ＝**传质系数**(m/s)

$C_{i,s}$ ＝**液滴表面的蒸气浓度**(kgmol/m^3)

$C_{i,\infty}$ ＝**气相主流的蒸气浓度**(kgmol/m^3)

需要注意的是,在 FLUENT 的蒸发定律中假定 N_i 为正值（蒸发状态）。如果 N_i 出现负值（即液滴温度低于露点温度，出现凝结现象），FLUENT 将把颗粒视为惯性颗粒($N_i = 0.0$)。

液滴表面的蒸汽分压假定等于液滴温度 T_p 所对应的饱和压力 p_{sat}，而此时的蒸汽浓度为对应此分压的浓度：

$$C_{i,s} = \frac{p_{sat}\left(T_p\right)}{RT_p} \qquad (19.3.13)$$

其中 R 为普适气体常数。

对于第 i 个组分，主流蒸汽浓度由组份输运方程求解得到；对于非预混以及部分预混燃烧，蒸汽浓度通过查找 PDF 表格（由 PrePDF 计算而来）得到：

$$C_{i,\infty} = X_i \frac{p_{op}}{RT_\infty} \qquad (19.3.14)$$

其中 X_i 为 i 组分的当地体积摩尔分数，p_{op} 为工作压力，T_∞ 为当地气相（体积平均）温度。

方程 19.3-12 中的传质系数由努塞尔关联式得到：

$$Nu_{AB} = \frac{k_c d_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6\,\mathrm{Re}_d^{1/2}\,Sc^{1/3} \qquad (19.3.15)$$

其中 $D_{i,m}$ ＝蒸汽扩散系数（m^2/s）

Sc ＝**（传质）施密特数，** $\dfrac{m}{rD_{i,m}}$

d_p ＝**颗粒（液滴）直径**（m）

由方程 19.3-12 得到的蒸汽流成为已经设定的某个 i 组分输运方程（请参阅 19.11）的源项（由

用户设定，或者是从非预混燃烧模型中的 PDF 表格得到)。
液滴的质量消耗为：

$$m_p(t+\Delta t)=m_p(t)-N_i A_p M_{w,i}\Delta t \qquad (19.3.16)$$

其中：

$M_{w,i}$=i 组分的摩尔质量（kg/kgmol）

m_p =液滴质量（kg）

A_p =液滴表面积（m^2）

FLUENT 也可以用一个刚性方程求解器求解方程 19.3-16 与传质耦合的问题。细节请参阅 19.7.3。

定义蒸气压和扩散系数

在设定工况时，用户可以把蒸汽压定义为温度的多项式或分段线性函数（$P_{sat}(t)$）。需要注意的是，由于 p_{sat} 是蒸发过程的推动力（方程 19.3-12，19.3-13），所以，蒸气压的定义非常重要。对于具体问题中可能出现的各种温度范围，用户需要提供相应的准确的蒸气压数值。蒸气压的数据可以从物理或工程手册（例如[175]）上查到。

可以在设定离散相物性的时候设定扩散系数 $D_{i,m}$ 的数值，需要注意的是，对连续相扩散系数的设定在计算过程中并未使用。

液滴的传热

最后，液滴的温度通过自身的热平衡得出，热平衡的计算式把液滴的焓变与两相间的对流传热、气化潜热联系起来：

$$m_p c_p \frac{dT}{dt}=hA\left(T_\infty-T_p+\frac{dm_p}{dt}h_{fg}+A_p e_p s\left(q_R^4-T_p^4\right)\right) \qquad (19.3.17)$$

其中：c_p =液滴（定压）比热（J/kg-K）

T_p =液滴温度（K）

h =对流给（传）热系数（W/m^2-K）

T_∞ =连续相温度（K）

$\frac{dm_p}{dt}$ =蒸发速率（kg/s）

h_{fg} =汽化潜热（J/kg）

e_p =颗粒黑度（无量纲）

s =斯蒂芬孙－玻耳兹曼常数（5.67*10^{-8}W/m^2-K^4）

q_R =辐射温度， $\left(\frac{I}{4s}\right)^{1/4}$ ，其中 I 为辐射强度

只有在使用了 P-1 模型或离散转移模型，并且在 Discrete Phase Model panel. 面板中选择了 Particle Radiation Interaction，然后激活了对颗粒辐射传热的选项，用户才可以计算颗粒引起的辐射传热。

对气相的释放／吸收的热量作为能量源／汇添加到随后的连续相能量方程计算中去。

19.3.4 定律 3 液滴沸腾

当液滴温度达到沸点温度 T_{bp} ，并且液滴质量大于非挥发份质量时，定律 3 可用来计算离散相液滴的对流沸腾：

$$T_p \geq T_{bp} \qquad (19.3.18)$$

并且；

$$m_p > \left(1 - f_{v,0}\right) m_{p,0} \qquad (19.3.19)$$

当液滴温度达到沸点温度时，沸腾蒸发速率方程[120]为：

$$\frac{d\left(d_p\right)}{dt} = \frac{4k\infty}{r_p c_{p,\infty} d_p}\left(1 + 0.23\sqrt{\mathrm{Re}_d}\right)\ln\left[1 + \frac{c_{p,\infty}\left(T_\infty - T_p\right)}{h_{fg}}\right] \qquad (19.3.20)$$

其中：

$c_{p,\infty}$ ＝气相（定压）比热（J/kg-K）

r_p ＝液滴密度（kg/m^3）

k_∞ ＝气相导热率（W/m-K）

方程 19.3-20 在推导过程中假定液滴处于等压、稳态流动状态。需要注意的是，在沸腾定律适用的范围内，若有沸腾现象发生的话，则 $T_\infty > T_{bp}$ ，并且模型假定液滴温度在沸腾过程中保持不变（＝T_{bp} ）。

如果考虑辐射的话,FLUENT 使用的是方程 19.3-20 的一个修正公式,这个公式由方程 19.3-17 推导而来，并且假定颗粒温度是常数。这就有：

$$\frac{dm_p}{dt} h_{fg} = hA_p\left(T_\infty - T_p\right) + A_p e_p s\left(q_R^4 - T_p^4\right) \qquad (19.3.21)$$

或者是：

$$\frac{d\left(d_p\right)}{dt} = \frac{2}{r_p h_{fg}}\left[\frac{k_\infty Nu}{d_p}\left(T_\infty - T_p\right) + e_p s\left(q_R^4 - T_p^4\right)\right] \qquad (19.3.22)$$

由努塞尔关联式 19.3-9，用经验常数替换上式的普朗特数，方程 19.3-22 变为：

$$\frac{d(d_p)}{dt}=\frac{2}{r_p h_{fg}}\left[\frac{k_\infty\left[1+0.23\sqrt{\mathrm{Re}_d}\right]}{d_p}(T_\infty - T_p)+e_p s\left(q_R^4 - T_p^4\right)\right] \qquad (19.3.23)$$

若不考虑辐射传热时，方程 19.3-20 中的对数项接近于 1，上述方程与方程 19.3-20 结果相差不多。若考虑辐射，FLUENT 使用方程 19.3-23，不考虑辐射，则用方程 19.3-20。只有选择了 P-1 或离散转移辐射模型，并且在 Particle Radiation Interaction 面板中激活了颗粒的辐射热传选项，才可以计算颗粒的辐射传热。

当使用沸腾定律时，假定颗粒始终处于等温状态。一旦这个定律被激活之后，它将一直应用到颗粒随后的轨道计算中。对于气相（连续相）来说液滴蒸发所需要的热量作为一个（负）源项作用到其能量方程中去。液滴蒸发之后就变成连续相的某个 i 组分（由用户定义，细节请参阅 19.11）进入气流主流中。

19.3.5 定律 4：挥发份析出

对于燃烧类型颗粒，当颗粒温度达到蒸发温度 T_p，并且颗粒质量 m_p 大于非挥发份质量时（即，颗粒中仍然存在挥发份时）：

$T_p \ge T_{vap}$ 和 $T_p \ge T_{bp}$ (19.3.24) ———第二项为升华过程

并且：

$$m_p > (1-f_{v,0})(1-f_{w,0})m_{p,0} \qquad (19.3.25)$$

其中，$f_{w,0}$ 是选择湿性燃烧颗粒（Wet Combustion）时，颗粒所含可蒸发／沸腾物质的质量分数，如未选此项，$f_{w,0}$=0。当应用定律 4 时，方程 19.3-24 所隐含的是颗粒的沸点温度 T_{bp} 等于其蒸发温度 T_{vap}。当选择了湿性燃烧颗粒时，T_{bp} 与 T_{vap} 分别为燃烧颗粒的沸点／析出温度。

FLUENT 提供了四种挥发份析出模型：

- 常速率反应模型（缺省模型）
- 单步反应模型
- 两步竞争反应模型(Kobayashi 模型)
- 化学渗透脱挥发份(CPD)模型

下面依次讲述各个模型.

挥发份析出模型的选择

在 Materials 面板中设定燃烧颗粒的物理属性时（细节请参阅 19.11.2），用户需要选择挥发份模型。缺省情况下，使用常速率反应模型（方程 19.3-36）。

常速率反应模型

常速率反应模型假定挥发份以某个固定的速率析出[13]：

$$-\frac{1}{f_{v,0}(1-f_{w,0})m_{p,0}}\frac{dm_p}{dt}=A_0 \qquad (19.3.26)$$

其中：

m_p = 颗粒质量（kg）

$f_{v,0}$ =颗粒的初始挥发份质量分数

$m_{p,0}$ =颗粒初始质量（kg）

A_o =析出速率常数（s^{-1}）

析出速率常数 A_o 由用户作为模型参数输入，其缺省值采用由 Pillai [180]在计算煤粉燃烧时所用的 12s^{-1}。若要使用此模型，必须选取合适的作为挥发份析出门槛值的蒸发温度。由文献中的数据显示，此值大致为 600K[13]。
颗粒的挥发份以用户定义的某个 i 组分（请参阅 19.11）进入到气相主流中。一旦进入主流中，挥发份就可通过设定的气相反应机制发生化学反应。

单步反应模型

单步反应模型假定析出速率与颗粒中保持的挥发份含量成一次幂关系（一级反应速率模型）[5]：

$$\frac{dm_p}{dt} = k\left[m_p - \left(1 - f_{v,0}\right)\left(1 - f_{w,0}\right)m_{p,0}\right] \qquad (19.3.27)$$

其中：

m_p =颗粒质量（kg）

$f_{v,0}$ =颗粒初始挥发份质量分数

$f_{w,0}$ =颗粒的可蒸发／沸腾物质的质量分数（如果选择了湿性颗粒）

$m_{p,0}$ =初始颗粒质量（kg）

k =反应速率常数（s^{-1}）

要注意的是颗粒初始挥发份质量分数 $f_{v,0}$，应该稍大于由近似分析得到的值。k =反应速率常数，通过 Arrhenius 公式中的指前因子和活化能确定：

$$k = A_1 e^{-(E/RT)} \qquad (19.3.28)$$

缺省情况下，FLUENT 使用由文献[5]确定的参数 A_1 和 E 。

方程 19.3-27 的近似分析解为：

$$m_p(t+\Delta t) = \left(1 - f_{v,0}\right)\left(1 - f_{w,0}\right)m_{p,0} + \left[m_p(t) - \left(1 - f_{v,0}\right)\left(1 - f_{w,0}\right)m_{p,0}\right]e^{-k\Delta t} \qquad (19.3.29)$$

上式假定在离散的积分时间间隔内，颗粒温度只发生轻微变化。
FLUENT 可以用一个刚性方程组求解器来把方程 19.3-29 与颗粒的传热进行耦合计算。细节请参阅 19.7.3

两步竞争反应模型(Kobayashi 模型)

FLUENT 可以选择由 Kobayashi [117]建议的两步竞争反应模型：

$$R_1 = A_1 e^{-(E_1/RT_p)} \qquad (19.3.30)$$

$$R_2 = A_2 e^{-\left(E_2 / RT_p\right)} \qquad (19.3.31)$$

其中 R_1, R_2 是竞争性析出速率常数，它们在不同的温度范围内控制着析出速率。两个速率常数按照不同的加权值组合构成了总析出速率的表达式：

$$\frac{m_v(t)}{\left(1-f_{w,0}\right)m_{p,0}-m_a} = \int_0^t \left(a_1 R_1 + a_2 R_2\right)\exp\left(-\int_0^t \left(R_1+R_2\right)dt\right)dt \qquad (19.3.32)$$

其中：

$m_v(t) = t$ 时刻已析出的挥发份质量

$m_{p,0}$ = 喷射源的初始颗粒质量

a_1, a_2 = 生成率因子

m_a = 颗粒的含灰量

Kobayashi 模型需要设置动力学参数 A_1, E_1, A_2, E_2 及生成率因子 a_1, a_2。缺省情况下，FLUENT 设定一次（慢速）反应的生成率因子为 0.3，二次（快速）反应为 1.0。由于 a_1 表示的是低温析出性能，所以文献[117]推荐将其设定为由近似分析得到的颗粒挥发份含量的分数。a_2 代表了高低温析出性能，可设定为 1。

方程 19.3-32 对时间进行积分，在缺省情况下，每个积分时间间隔内，颗粒温度设为常数。FLUENT 可以用一个刚性方程组求解器耦合求解方程 19.3-32 与传热问题。细节请参阅 19.7.3。

CPD 模型[1]

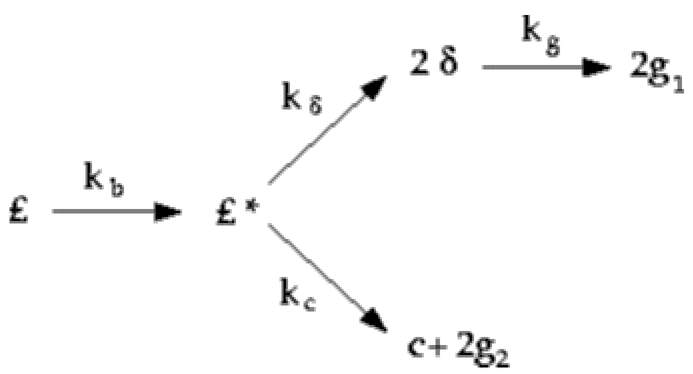
上述的煤粉挥发份析出模型建立在经验析出速率上，而化学渗透析出模型（CPD）则是建立在分析煤粉结构在快速加热析出过程中的物理、化学变化基础上[68, 69, 81]。

概述

在煤炭热解过程中，碳粒网格结构（即碳的化学结晶结构）中芳香族之间的桥键断裂，一般会形成两种断裂后的碎片（结构）。一种碎片具有较低的分子量（因而饱和蒸气压较高），并且作为气相从煤粉颗粒中逃逸出去；另一种碎片具有较大的分子量（因而炮和蒸汽压较低）并且在典型热解过程中，倾向于在焦炭颗粒中保持更长的时间。与此同时，碳粒的结构会发生改变（被称为交联）。大分子量的成分与残余的焦炭网格一起被称为后形质体。挥发份析出时，焦炭的软化点一般就由这种物质的数量及属性确定。挥发份析出后，碳粒中残存的网格结构就是由焦炭以及矿物质的灰构成。

CPD 模型认为碳粒结构是由简化的网格或网络组成，连接网络的是各种化学桥键，而连接对象则是各种芳香族成分。通过这样简化的组成结构来刻画焦炭的物理、化学转变过程。然后，把桥键的断裂以及轻组份气体的生成、焦炭的生成、半焦的生成全部看作由化学动力学控制的形式：

[1] CPD 模型主要由 Brigham Young University 大学的 Thomas H. Fletcher 等人发展而来，详情可浏览其个人网址：http://www.et.byu.edu:8080/~tom/



图表 19.3.1 碳的桥键

变量 £代表焦炭网络中初始的桥键总数。加热后，这些桥键转变为反应性桥键 £。对这些反应性桥键，有两可能的竞争性转化过程。一种转化途径是，桥键发生反应，形成侧链，d 而侧链可能就会从苯环上脱落形成气组份气体，g_1。当相邻苯环间的桥键断裂时，碳的一部分实际就从碳粒的网络结构中被分离出去了，这些分离出去的部分是大分子量半焦并且最终要形成后性质体。Metaplast 蒸法而又形成焦炭。在蒸法的同时，metaplast 也可能会重新连接到碳粒的网络上（交联）。另一个转化途径是，桥键发生反应生成碳桥 c，同时相应释放气组份的气体产物 g_2。碳粒网络中总的桥键数可由变量表示，$p = £ + c$。

反应速率

一旦给定各种变量之后，就可以确定各种反应速率常数。其中，假定反应性桥键的消亡速率与生成速率（$\frac{\partial £^*}{\partial t}=0$）相等：

$$\frac{d£}{dt} = -k_b £ \qquad (19.3.33)$$

$$\frac{dc}{dt} = k_b \frac{£}{r+1} \qquad (19.3.34)$$

$$\frac{dd}{dt} = \left[2 r k_b \frac{£}{r+1} \right] - k_g d \qquad (19.3.35)$$

$$\frac{dg_1}{dt} = k_g d \qquad (19.3.36)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = 2\frac{dc}{dt} \qquad (19.3.37)$$

其中，桥键断裂以及气体释放速率常数 k_b, k_g 以带有分布活化能的 Arrhenius 形式给出：

$$k = Ae^{-(E \pm E_s)/RT} \qquad (19.3.38)$$

其中 A, E, E_s 分别为指前因子、活化能、活化能的分布方差，R 为普适气体常数，T 为温度，反应速率常数之比 $r = k_d / k_c$，由实验数据一般定为 0.9

质量守恒

下列的质量守恒必须要遵守：

$$g = g_1 + g_2 \qquad (19.3.39)$$

$$g_1 = 2f - s \qquad (19.3.40)$$

$$g_2 = 2(c - c_0) \qquad (19.3.41)$$

其中 f **为断裂桥键的分数（**$f = 1 - p$**）。系统的初始条件为：**

$$c(0) = c_0 \qquad (19.3.42)$$

$$\pounds(0) = \pounds_0 = p_0 - c_0 \qquad (19.3.43)$$

$$d(0) = 2f_0 = 2(1 - c_0 - \pounds_0) \qquad (19.3.44)$$

$$g(0) = g_1(0) = g_2(0) = 0 \qquad (19.3.45)$$

其中，c_0 **为碳桥键的初始分数，** p_0 **为碳粒网络中桥键的初始分数，** $\pounds_0$ **为碳粒网络中可断裂桥键的初始分数。**

煤粉质量分数变化

一旦给定煤的结构参数所对应的各个反应方程式，就必须要把这些参数与煤的质量变化以及挥发份的释放量关联起来。因此，煤质量的变化可按三部分来划分：轻组份气体（ f_{gas}**），半焦（** f_{frag} **）以及焦炭（** f_{char}**）。这种划分形式可由半焦网络的统计理论得到：**

$$f_{gas}(t) = \frac{r(g+g)(s+1)}{4 + 2r(1-c_0)(s+1)} \qquad (19.3.46)$$

$$f_{frag}(t) = \frac{2}{2 + r(1-c_0)(s+1)}\left[\Phi F(p) + r\Omega K(p)\right] \qquad (19.3.47)$$

$$f_{char}(t) = 1 - f_{gas}(t) - f_{frax}(t) \qquad (19.3.48)$$

其中，变量$\Phi, \Omega, F(p), K(p)$**是基于半焦网络统计理论得到的关于断桥的统计特征量，可由下述方程确定：**

$$\Phi = 1 + r\left[\frac{\pounds}{p} + \frac{(s-1)d}{4(1-p)}\right] \qquad (19.3.49)$$

$$\Omega = \frac{d}{2(1-p)} - \frac{\pounds}{p} \qquad (19.3.50)$$

$$F(p)=\left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{s+1}{s-1}} \qquad (19.3.51)$$

$$K(p)=\left[1-\left(\frac{s+1}{2}\right)p'\right]\left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{s+1}{s-1}} \qquad (19.3.52)$$

r 为具有桥键的组分质量与无桥键的组分质量之比，m_b/m_a 其中：

$$m_b=2M_{w,d} \qquad (19.3.53)$$

$$m_a=M_{w,1}-(s+1)M_{w,d} \qquad (19.3.54)$$

其中，$M_{w,d}, M_{w,1}$ 分别为侧链与苯环的分子量。$s+1$ 为煤网络的配位数。它由固态核磁共振法（NMR）得到，p' 为下述方程（p 方程，p 为煤网络中的桥键总数）的根：

$$p'(1-p')^{s-1}=p(1-p)^{s-1} \qquad (19.3.55)$$

为了考虑半焦 metaplast（焦油前驱物）的质量影响，蒸发部分质量被视为闪蒸过程，在此过程中，假定到达气液平衡状态的时间与桥键反应时间具有相同量级。对于每个时刻的气液平衡状态，蒸气压的修正形式采用了 Raoult's 定律的简化形式。蒸气压对强烈依赖于压力的挥发分析量的预报影响很大。对于重新结合到煤粉网络结构上的半焦，其交联（反应）速率可写为为如下的表达式：

$$\frac{dm_{cross}}{dt}=m_{frag}A_{cross}e^{-(E_{cross}/RT)} \qquad (19.3.56)$$

其中，m_{cross} 为重新结合到煤粉网络上的半焦质量，m_{frag} 为焦油前驱物（半焦）的质量，A_{cross} 与 E_{cross} 为反应速率常数。

CPD 模型输入项

一旦确定了 CPD 模型的方程及反应速率常数之后，我们就要关心模型中所定义的各个常数。从上述模型的各种定义及其之间联系中，可知，下述的参数将依赖于煤种[68]:而有所不同：

- 反应速率常数 k_b, k_g 中的 $A_b, E_b, E_{s,b}, A_g, E_g, E_{s,g}$
- A_{cross}, E_{cross}, r

这些参数包含在子模型中，在问题定义过程中不需要输入或修改。

另外 5 个参数依赖于煤种，在问题定义中必须要进行设定：

- 煤粉网络结构中初始桥键分数，p_0
- 初始碳键分数，c_0
- 配位数，$s+1$
- 单体分子量(cluster molecular weight)，$M_{w,1}$

- 侧链官能团的分子量，$M_{w,d}$

上面的前四个参数是由 NMR 方法测得的表征煤炭结构特征的经验数据。最后一个参数表示了开始阶段存在于煤炭中或者是在热解初期的碳键数目，它可以根据煤阶进行估计。 这些参数在 Materials 面板中进行输入（请参阅 19.11.2 节）。表 19.3.1 列出了各种煤的依赖于煤种参数的数值。

煤种	$s+1$	p_0	$M_{w,1}$	$M_{w,d}$	c_0
Zap（AR）	3.9	0.63	277	40	0.20
Wyodak（AR）	5.6	0.55	410	42	0.14
Utah（AR）	5.1	0.49	359	36	0
Ill6（AR）	5.0	0.63	316	27	0
Pitt8（AR）	4.5	0.62	294	24	0
Stockton（AR）	4.8	0.69	275	20	0
Freeport（AR）	5.3	0.67	302	17	0
Pocahontas（AR）	4.4	0.74	299	14	0.20
Blue（Sandia）	5.0	0.42	410	47	0.15
Rose（AFR）	5.8	0.57	459	48	0.10
1443（褐煤,ACERC）	4.8	0.59	297	36	0.20
1488（次烟煤,ACERC）	4.7	0.54	310	37	0.15
1468（无烟煤,ACERC）	4.7	0.89	656	12	0.25

表 19.3.1 13 种煤种的 ^{13}C 核磁共振方法得到的化学结构参数

AR 表示从 Argonne premium sample bank[224, 251]得到的八个煤种数据；Sandia 表示数据来源于 Sandia National Laboratories[67].；AFR 表示数据来源于 Advanced Fuel Research；ACERC 表示表示从 Advanced Combustion Engineering Research Center 得到的三个煤种数据[2]

挥发份析出时的颗粒膨胀

在颗粒的脱挥发份时，颗粒直径要发生变化，其表现为颗粒的膨胀系数 C_{sw}。他由用户定义，并有：

$$\frac{d_p}{d_{p,0}} = 1 + (C_{sw} - 1)\frac{(1 - f_{w,0})m_{p,0} - m_p}{f_{v,0}(1 - f_{w,0})m_{p,0}} \qquad (19.3.57)$$

其中：

$d_{p,0}$ = 颗粒在开始析出时的直径

d_p = 当前颗粒直径

[2] Argonne premium sample bank 一个商业数据库：http://www.anl.gov/LabDB/Current/Ext/H161-text.002.html；Sandia National Laboratories 能源部的国家实验室：http://www.sandia.gov/；Advanced Fuel Research 康奈提格州的一家商业公司：http://www.afrinc.com/；Advanced Combustion Engineering Research Center，建于 Brigham Young 大学与 Utah 大学的实验室：http://www-acerc.byu.edu/

$\frac{(1-f_{w,0})m_{p,0}-m_p}{f_{v,0}(1-f_{w,0})m_{p,0}}$ 为已挥发掉的 质量与颗粒本身所含挥发份质量之比。当挥发份定律生效时，此比例接近为 1.0。颗粒膨胀系数等于 1 意味着颗粒直径保持不变；若为 2.0，颗粒最终直径为初始直径的两倍；若为 0.5，则对应为一半。

脱挥发份时的传热

脱挥发份时颗粒的传热包括对流给热、辐射给热（如果激活该选项）、以及脱挥发份引起的传热：

$$m_p c_p \frac{dT}{dt} = hA(T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p e_p s\left(q_R^4 - T_p^4\right) \qquad (19.3.58)$$

只有应用了 P-1 或离散转移辐射模型，并且在 Particle Radiation Interaction 面板中激活了颗粒的辐射热传选项，上式的计算才包括颗粒的辐射热传。

缺省情况下,方程 19.3-58 由分析解计算得到，在一个时间步内，假定颗粒的温度与质量不发生变化：

$$T_p(t+\Delta t) = a_p + \left[T_p(t) - a_p\right]e^{-b_p t} \qquad (19.3.59)$$

其中：

$$a_p = \frac{hA_p T_\infty + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p e_p s q_R^4}{hA_p + A_p e_p s q_p^3} \qquad (19.3.60)$$

和：

$$b_p = \frac{A_p\left(h + e_p s T_p^3\right)}{m_p c_p} \qquad (19.3.61)$$

FLUENT 也可以用一个刚性方程求解器求解方程 19.3-58 与传质耦合的问题。细节请参阅 19.7.3。

19.3.6 定律 5：表面燃烧

一旦挥发份全部析出之后，颗粒就开始进行表面反应，以烧掉颗粒的可燃组分 f_{comb}。此时，定律 5 开始生效：

$$m_p < (1-f_{v,0})(1-f_{w,0})m_{p,0} \qquad (19.3.62)$$

直到可燃组分全部消耗：

$$m_p > (1-f_{v,0})(1-f_{w,0})m_{p,0} \qquad (19.3.63)$$

在定律 5 适用的过程中，当颗粒的可燃组分全部消耗掉之后，他就只剩下残余“灰分”，此时，颗粒转变为惯性颗粒（定律 6 适用，请参阅 19.3.2)。

除了多表面反应模型之外，表面燃烧模型按照表面反应模型所确定的化学计量比消耗掉颗粒中的可燃组分：

$$char(s) + S_b ox(g) \rightarrow products(g) \qquad (19.3.64)$$

其中 S_b

定义为单位质量焦碳所消耗的氧化剂质量。氧化剂与燃烧产物在面板 Set Injection Properties panel.进行组分定义。

对于燃烧颗粒，FLUENT 提供四种异相表面反应机制模型：

- 扩散控制反应速率模型（缺省模型）
- 动力学／扩散控制反应速率模型
- 内部控制反应速率模型
- 多表面反应模型

下面逐一介绍各个模型。在设定燃烧颗粒的物理属性时，用户可选择表面燃烧模型。设定过程在 Materials panel,面板中进行，细节请参阅 19.11.2。缺省情况下，程序使用扩散控制模型。

扩散控制反应速率模型

扩散控制反应速率模型是 FLUENT 的缺省模型。该模型假定表面反应速率等于由气相氧化剂向颗粒表面的扩散速率：

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{ox} T_\infty \rho_g}{S_b \left(T_p + T_\infty\right)} \qquad (19.3.65)$$

其中：

$D_{i,m}$ = 氧化剂的体积扩散系数（m^2/s）

Y_{ox} = 气相中氧化剂的当地质量分数

ρ_g = 气相密度（kg/m^3）

S_b = 方程 19.3-64 的化学反应计量比

方程 19.3-65 由 Baum and Street [13]的模型导出，该模型忽略了反应动力学对表面反应速率的影响。扩散控制反应速率模型家底颗粒直径不发生变化。由于颗粒质量逐步减少，其有效密度也在逐步降低，并且逐步变成多孔性物质。

动力学／扩散控制反应速率模型

动力学／扩散控制反应速率模型假定表面反应速率同时受到扩散过程和应动力学的影响。FLUENT 使用 Baum and Street [13] 和 Field [65]得到的模型，该模型的扩散速率常数为：

$$D_0 = C_1 \frac{\left[\left(T_p + T_\infty\right)/2\right]^{0.75}}{d_p} \qquad (19.3.66)$$

以及化学（动力学）反应速率常数为：

$$R = C_2 e^{-\left(E/RT_p\right)} \qquad (19.3.67)$$

依据二者不同的加权值得到焦碳的燃烧速率为：

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p^2 p_{ox} \frac{D_o R}{D_0 + R} \qquad (19.3.68)$$

其中 p_{ox} 为颗粒周围的气相氧化剂分压，R 为考虑了焦碳内表面的反应及其扩散的化学(动力学）反应速率常数。FLUENT 中方程 19.3-68 按照氧化剂的质量分数写为：

$$\frac{dm_p}{dt} = -pd_p^2 \frac{rRTY_{ox}}{M_{w,ox}} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \qquad (19.3.69)$$

模型中假定颗粒尺寸不变，但颗粒密度可以降低。

选择这个模型时，方程 19.3-66、19.3-67 的模型参数可以在 **Materials** panel 面板中设定，细节请参阅 19.11。

渗透模型

FLUENT 中使用的渗透模型基于 Smith's[218],提出的模型，该模型认为反应为一级反应。与动力学／扩散控制模型一样，渗透模型同时考虑了体积扩散与化学动力对燃烧反应的影响（请参阅 19.3-69）。渗透模使用方程 19.3-66 计算扩散速率 D_0，但化学反应速率 R 与颗粒内表面反应及孔隙内的扩散相关；

$$R = h \frac{d_p}{6} r_p A_g k_i \qquad (19.3.70)$$

其中，h 为有效系数，或者称作实际燃烧速率与不存在孔隙扩散阻力时的燃烧速率的比值[130]：

$$h = \frac{3}{f}(f \coth f - 1) \qquad (19.3.71)$$

其中 f 为 Thiele 系数：

$$f = \frac{d_p}{2} \left[\frac{S_b r_p A_g k_i p_{ox}}{D_e C_{ox}} \right]^{1/2} \qquad (19.3.72)$$

C_{ox} 为气相氧化剂的质量浓度，D_e 为颗粒内部的有效扩散系数。假定孔隙尺寸为单峰分布，并且体积扩散与 Knudsen 渗透过程同时存在，D_e 的表达式为：

$$D_e = \frac{q}{t^2} \left[\frac{1}{D_{Kn}} + \frac{1}{D_0} \right]^{-1} \qquad (19.3.73)$$

其中 D_0 为体积摩尔扩散系数，q 为焦碳孔隙度：

$$q = 1 - \frac{r_p}{r_t} \qquad (19.3.74)$$

r_p, r_t 分别为热解碳粒的表观与骨架密度。

t (方程 19.3-73)为孔隙扭曲度。其缺省值为 $\sqrt{2}$，这对应着颗粒孔隙与其外表面的平均交角为 45°[130]。

D_{Kn} 为 Knudsen 扩散系数：

$$D_{Kn} = 97.0\bar{r}_p \sqrt{\frac{T_p}{M_{w,ox}}} \qquad (19.3.75)$$

其中T_p为颗粒温度，$\bar{r}_p$为碳粒孔隙的平均半径，它可以通过压汞仪测量。

需要注意的是，低阶煤中，大尺度孔隙（$\bar{r}_p > 150\,\mathring{A}$）占主导地位，而对高阶煤来说，微尺度孔隙（$\bar{r}_p < 10\,\mathring{A}$）占主导地位[130]。

A_g（方程 19.3-70，19.3-72）为碳粒的比表面积，在此模型中假定在颗粒燃烧过程中，其保持不变。对于不同热解煤的内部孔隙的数据可以从文献[217].中得到。燃烧过程中的碳粒的平均内表面积大于热解过程中的相应值[130]。例如，对于烟煤来说，其内表面大概为 $300m^2/g$。

k_i（方程 19.3-70，19.3-72）为渗透反应速率常数，以 Arrhenius 式表示为；

$$k_i = A_i e^{-(E_i / RT_p)} \qquad (19.3.76)$$

对于每种焦碳，可以测得其相应的指前因子A_i和活化能E_i。在没有实验数据的情况下，可以使用 FLUENT 提供的缺省值，这些数据时从大量实验数据（包括碳粒）中按最小二乘法拟合得到。

为了更充分的考虑燃烧过程中颗粒尺寸的变化（因而密度也改变了），用户可以规定一个燃烬模型（burning mode）a，它把颗粒的尺寸与其燃烬率U（$U = 1 - m_p / m_{p,0}$）联系起来[216]：

$$\frac{d_p}{d_{p,0}} = (1-U)^a \qquad (19.3.77)$$

其中m_p为颗粒当前质量，下标 0 表示其为初始（刚开始燃烧时）质量。需要注意，a 的值位于 0-1/3 之间：0 值表示在燃烬的过程中颗粒尺寸不变而密度降低（区域 1），1/3 表示密度不变而尺寸降低（区域 3）。在区域 2，a 取为 0.25，对应的是颗粒尺寸与密度都发生了变化。这个值（0.25）适用于许多个煤种[216]。

但激活这个模型的时候，方程 19.3-66，19.3-70，19.3-72，19.3-73，19.3-75，19.3-76 以及 19.3-77 中的各个参数值可以在 **Materials** panel 面板中设定，细节请参阅 19.11。

多表面反应模型

多表面反应与固体表面反应模型的机理相同，只是在此处，表面组分变为“颗粒表面组分”。对于在 Species Mode 面板中定义的混合组成，颗粒表面组分既可以生成也可以消耗，其反应按颗粒表面反应（在 Reactions 面板中定义）化学计量式进行。如果某个颗粒表面组分出现消耗，那么，颗粒所含有的“焦碳”组分就减少了；相反，如果某个颗粒表面组分在颗粒表面反应过程中出现生成，那么，生成的组分就会进入颗粒“灰烬”中。对于任何燃烧颗粒，用户可以定义多种表面反应与表面组分。但对于一种颗粒表面反应，只能定义一种表面反应组分。

程序允许定义多个喷射入口。并且，也可以在已经定义了遵守其他燃烧反应定律的燃烧颗粒的同时再通过定义多表面反应模型定义新的燃烧颗粒。这个模型基于对碳粒的氧化性能的研究，它可适用于一般的气-固反应系统，不仅仅是适用于焦碳的氧化反应。
关于颗粒表面反应的细节请参阅 13.3。
使用限制（范围）
注意的是在使用多表面反应模型具有如下的限制：

- 在非稳态计算中不能使用此模型
- 对于体积反应，只有使用组分输运模型的同时才可以使用此模型；对于非预混模型、预混反应模型、以及部分预混反应模型，此模型不能使用

碳粒燃烧过程中的传热与传质
表面反应消耗了气相中的氧化剂组分，即此反应对（氧化剂）组分输运方程的计算来说，产生了一个负的源项。同理，在这个异相表面反应过程中，生成的气相组分是与其对应的组分输运方程的正源项。同时，表面反应按照用户定义的释热率产生／消耗热量。
颗粒表面反应的热平衡方程为：

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p\left(T_\infty - T_p\right) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_{reac} + A_p e_p s\left(q_R^4 - T_p^4\right) \qquad (19.3.78)$$

其中 H_{reac} 为表面反应的释热率。需要注意的是，由化学反应释放的热量只有一部分（$1-f_h$）作用到气相能量方程中的源项：颗粒吸收了部分（f_h）释热量。对于煤粉燃烧来说，若生成产物为 CO，f_h 的推荐使用值为 1.0 ；若是 CO_2，推荐使用 0.3[24]。

只有在使用了 P-1 模型或离散转移模型，并且在 **Discrete Phase Model** panel. 面板中选择了 **Particle Radiation Interaction**，然后激活了对颗粒辐射传热的选项，你才可以计算颗粒引起的辐射传热。
缺省情况下,方程 19.3-78 由分析解计算得到，在一个时间步内，假定颗粒的温度与质量不发生显著变化。
FLUENT 也可以用一个刚性方程求解器求解方程 19.3-78 与传质耦合的问题。细节请参阅 19.7.3。
19.7.3 在一般异相表面反应中使用燃烧颗粒模型
FLUENT 中的燃烧颗粒模型主要着眼于模拟煤粉颗粒的燃烧。但是，用户可以用颗粒燃烧模型来模拟发生在颗粒表面的一般异相表面反应，在此反应过程中，固体颗粒与气相组分发生化学反应生成单一的气相生成物。例如：

$$4Al(s) + 3Cl_2 \rightarrow 2Al_2Cl_3(g)$$

只要设定挥发份含量为 0 来忽略挥发份析出过程（定律 4），就可以模拟上述的反应过程。这种情况下，表面反应定律 5 提供了一个一般的异相表面反应机理。在这个过程中，气相‘ 氧化剂 ” 被消耗掉，同时生成了气相的反应产物（由用户定义）。

19.4 喷雾模型

除了 19.9.2 所提到的简单喷射模型，对于喷雾过程，FLUENT 提供更为复杂的喷雾模型。对多数喷射入口，用户需要设定颗粒的初始直径、位置以及速度。但是，对喷雾来说，可以使用模型来模拟液滴的迸裂、合并（团聚）以及不同颗粒形状引起的颗粒曳力系数的变化。这一节介绍对实际喷雾过程进行模拟的模型。

内容安排如下：

19.4.1 雾化模型
19.4.2 液滴合并模型
19.4.3 喷雾液滴迸裂模型
19.4.4 动态曳力模型

19.4.1 雾化模型

FLUENT 提供五种雾化模型：

- 平口喷嘴雾化(plain-orifice atomizer)
- 压力－旋流雾化(pressure-swirl atomizer)
- 靶式雾化(flat-fan atomizer)
- 气体辅助雾化(air-blast/air-assisted atomizer)
- 气泡雾化(effervescent/flashing atomizer)

用户可以在 **Set Injection Properties** 面板中选择喷嘴类型及其相应参数(细节请参阅 19.9.2)。下面就介绍各个喷嘴模型

概述

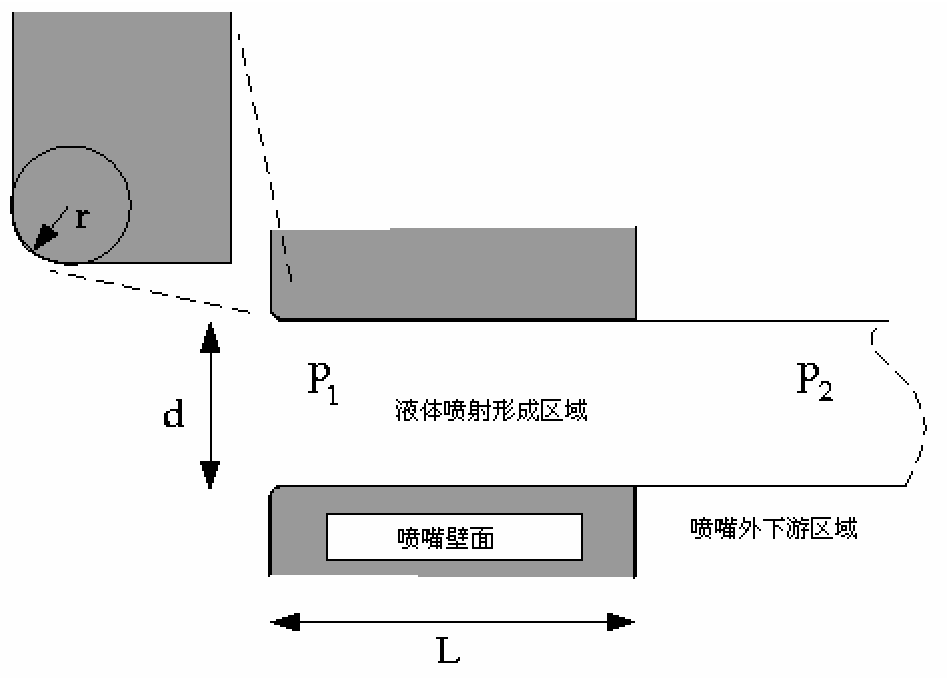
所有的模型都是用喷嘴的物理及尺寸参数（例如喷口直径、质量流率）来计算初始颗粒尺寸、速度、位置。

对于实际的喷嘴模拟来说，无论是颗粒的喷射角度还是其喷出时间都是随机分布的。但对 FLUENT 的非雾化喷射入口来说，液滴都是在初始时刻以一个固定的轨道喷射出去（到流场中去）。喷雾模型中使用随机选择模型得到液滴的随机分布。

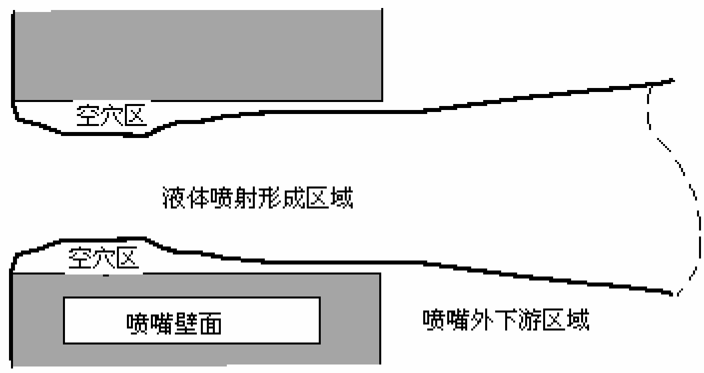
随机选择轨道表明初始液滴的喷射方向是随机的。所有的喷嘴模型中都要设第初始喷射角（范围），颗粒通过随机的方法在这个范围内得到一个初始喷射方向。这种方法提高了由喷射占主导地位流动的计算精度。在喷嘴附近，液滴在计算网格内的分布趋向于更加均匀，这样，通过气相作用于液滴上的曳力就加强了气相－液滴之间的耦合作用。

平口喷嘴雾化(plain-orifice atomizer)模型

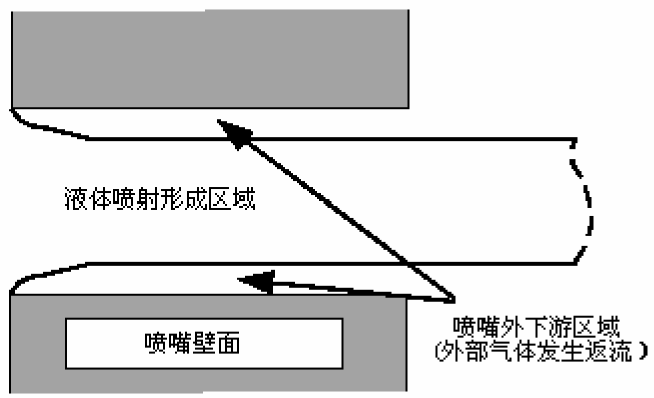
平口喷嘴是最常见也是最简单的一种雾化器。但对于其内部与外部的流动机制却很复杂。液体在喷嘴内部得到加速，然后喷出，形成液滴。这个看似简单的过程实际却及其复杂。平口喷嘴可分为三个不同的工作区：单相区、空穴区、以及回流区（flipped）[225]。不同工作区的转变是个突然的过程，并且产生截然不同的喷雾状态。喷嘴内部区域决定了流体在喷嘴处的速度、初始颗粒尺寸、以及液滴分散角。每种喷雾机制如下图示（图 19.4.1、19.4.2、19.4.3）：



图表 19.4.2 **单相流雾化喷嘴流动（液体完全充满喷头内部）**



图表 19.4.3 **空穴喷嘴流动（喷头倒角处产生了空穴）**



图表 19.4.4 **返流型喷嘴流动（在喷头内，下游气体包裹了液体喷射区）**

喷嘴内部流型

因为内部流动状态与外部的喷雾状况紧密相关，所以首先要确定平口喷嘴模型的内部流型。遗憾的是并没有什么理论可以计算流型。所以,我们不得不依赖由实验数据得到的经验模型。对于喷嘴内部流动，建议的流型影响参数表如下：

喷头半径	d
喷嘴长度	L
喷头内部倒角半径	r
上游压力	p_1
下游压力（雾化背压）	p_2
液体粘度	m
液体密度	r_l
液体饱和蒸气压	p_v

表格 1 19.4.1 流型影响参数表

就象这些参数可以组合形成无量纲量，例如 $r/d, L/d$ **。同样，基于"压头"的雷诺数（** Re_h **）及空穴参数（** K **）为：**

$$\mathrm{Re}_h = \frac{d r_l}{m}\sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{r_l}} \qquad (19.4.1)$$

$$K = \frac{p_1 - p_v}{p_1 - p_2} \qquad (19.4.2)$$

就象图 19.4.2、19.4.3 **一样，流体一般会在喷嘴内收缩。**Nurick [166]**发现定义收缩系数（** C_c **）有好处，它表示的是收缩后的流体面积与实际截面积之比：**

$$C_c = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{C_{ct}} - \frac{11.4r}{d}}} \qquad (19.4.3)$$

C_{ct} **为等于** 0.611 **的理论常数，它是从返流喷嘴的势流分析中得到的。**

另一个描述喷嘴性能的参数是流量系数（ C_d **）。它是通过喷嘴的液体质量流率与理论最大流率之比：**

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A\sqrt{2 r_l (p_1 - p_2)}} \qquad (19.4.4)$$

空穴数（方程 19.4-2 **中的** K **）是预测空穴发生与否的基本参数。对于短而尖锐边缘的喷嘴，喷嘴的空穴现象会在** $K \approx 1.9$ **时发生。但是，为了考虑入口倒角及粘度的影响，经验关联式**

为：

$$K_{incep} = 1.9\left(1 - \frac{r}{d}\right)^2 - \frac{1000}{\mathrm{Re}_h} \qquad (19.4.5)$$

同样，返流发生时的临界 K 值定义为 K_{crit}：

$$K_{crit} = 1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{L}{4d}\right)\left(1 + \frac{2000}{\mathrm{Re}_h}\right)e^{70r/d}} \qquad (19.4.6)$$

如果 r/d 大于 0.5，那么返流就不可能发生，此时设定 K_{crit} 为 1.0。

上述参数通过一个决策树（图 19.4.4）来确定喷嘴流型。依据不同的流型，确定了对应上述方程的唯一值。
对于单相流喷嘴[137]：

$$C_{du} = 0.827 - 0.0085\frac{L}{d} \qquad (19.4.7)$$

$$C_d = \frac{1}{\frac{1}{C_{du}} + 20\frac{(1 + 2.25L/d)}{\mathrm{Re}_h}} \qquad (19.4.8)$$

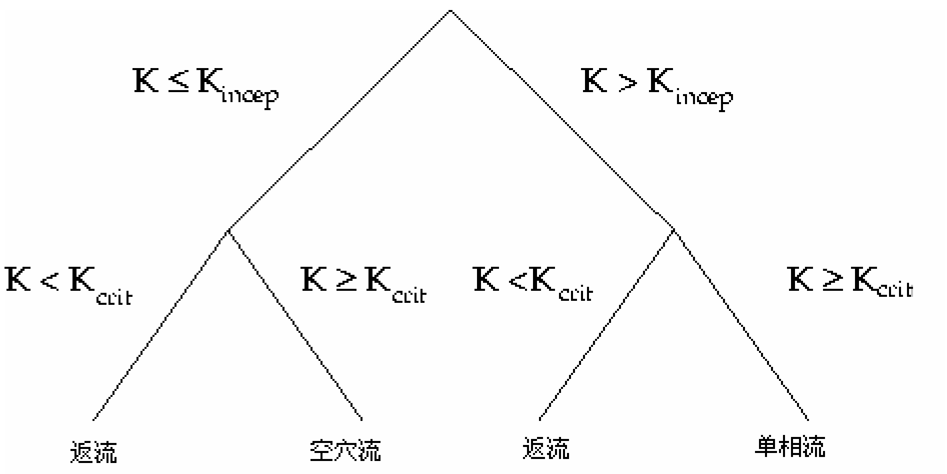
方程 19.4.7 确定了流量系数 C_{du} 的最终值，而方程 19.4-8 为考虑了粘度影响的最终值。

对于空穴喷嘴[[166]：

$$C_d = C_c\sqrt{K} \qquad (19.4.9)$$

对于返流喷嘴[166]：

$$C_d = C_{ct} \qquad (19.4.10)$$



图表 5 喷嘴空穴流型决策树

喷嘴的流动方程按照迭代求解，迭代过程中使用的流量系数由喷嘴的流型确定。当流动的上

（下）游压力变化时，其流型也要发生相应的变化。一旦喷嘴的流型确定之后，喷嘴速度以及喷射角、初始液滴尺寸分布也就确定下来。

喷出速度

由质量守恒以及假定速度均匀分布可以得到喷出速度的近似值：

$$u = \frac{\dot{m}}{r_l A} \qquad (19.4.11)$$

对于空穴流动，Schmidt 和 Corradini [204]发现喷口速度均匀分布的假设是不精确的。相反的，对高速液体喷射形成区域，他们推导出的速度表达式为：

$$u = \frac{2C_c p_1 - p_2 + (1-2C_c)p_v}{C_c\sqrt{2r_l(p_1 - p_v)}} \qquad (19.4.12)$$

对于空穴喷嘴，FLUENT 使用此分析解。

对于返流喷嘴，喷口速度由质量守恒以及液体喷射形成区域的面积确定：

$$u = \frac{\dot{m}}{r_l C_{ct} A} \qquad (19.4.13)$$

喷射角度

喷射角的修正由 Ranz [184]:得到：

$$\frac{q}{2} = \tan^{-1}\left[\frac{4p}{C_A}\sqrt{\frac{r_g}{r_l}}\frac{\sqrt{3}}{6}\right] \qquad (19.4.14)$$

$$\frac{q}{2} = 0.01 \qquad (19.4.15)$$

方程 19.4-14 适用于单相和空穴喷嘴的喷射角计算。对于反流喷嘴，喷射角等于常数（方程 19.4-15）。

喷嘴尺寸对应了一个定值C_A。所以用户必须设定此值。C_A 值越大，喷射区域就越小。

Reitz [189]建议对它进行如下修正：

$$C_A = 3 + \frac{L}{3.6d} \qquad (19.4.16)$$

喷射角度的大小强烈依赖于喷嘴的内部流动。因此，对于空穴喷嘴，用户设定的C_A 值应该比单相流的要小才可以。C_A 的常见取值范围为 4.0～6.0。返流喷嘴的喷射角度更小，任意的值代表喷嘴出口的紊流状态很弱。

液滴直径分布

最后，用户必须要确定喷口处的液滴直径分布。其分布与喷嘴流型紧密相关。FLUENT 的喷雾模型用液滴的最可几分布直径及分布指数来确定液滴的 Rosin-Rammler 分布。关于 Rosin-Rammler 分布的细节请参阅 19.9.7。

对单相流喷嘴，使用的是 Wu [270]等人的修正式。此修正式把液滴直径与喷口的湍流状态关联起来：

$$d_{32} = 133.0\, l\, We^{-0.74} \qquad (19.4.17)$$

其中d_{32}为索太尔中位径，l 为湍流长度标尺，We为液滴韦伯数，其定义为：

$$We \equiv \frac{r_l u^2 l}{s} \qquad (19.4.18)$$

其中$l = d/8$，s 为液滴表面张力系数。关于液滴表面张力及韦伯数的细节请参阅 19.4.3。

对于空穴喷嘴，FLUENT 使用方程 19.4-17 的一个修正式。Wu 的修正式中初始喷射区域直径由喷口流动的有效面积确定。关于有效面积的解释请参阅 Schmidt and Corradini [204]。

空穴流动的长度标尺为 $l = d_{eff}/8$，其中：

$$d_{eff} = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{p r_l u}} \qquad (19.4.19)$$

对于返流喷嘴，此时液滴直径设定为液体流动形成区的液滴直径：

$$d_0 = d\sqrt{C_{ct}} \qquad (19.4.20)$$

其中定义为最可几分布直径。

分布指数 s 从对过去模型试验以及对试验的总结中得到。表 19.4.2 列出了三种喷嘴的s 值。

表格 2 不同喷嘴流型的分布指数

流型	分布指数
单相流	3.5
空穴流动	1.5
返流	∞

分布指数越大，液滴的直径分布就越窄。Rosin-Rammler 分布的数学表达式使用参数最可几分布直径和分布指数。但是 Wu 等人使用的是索太尔中径d_{32}，所以必须要转化成中位径d_0。

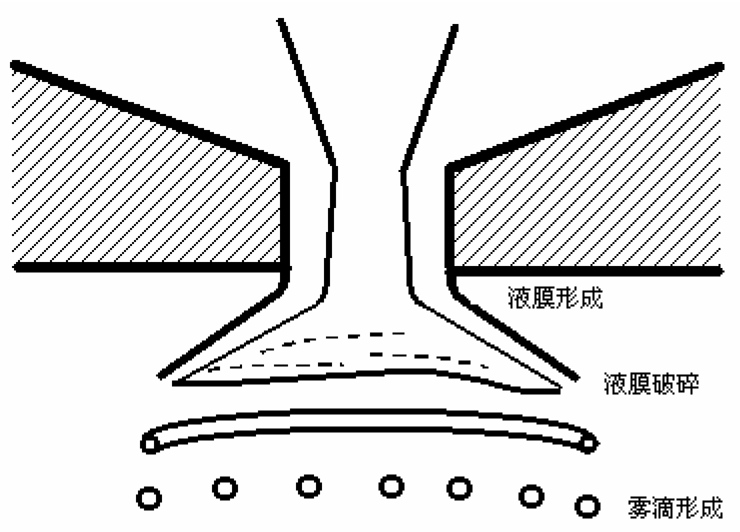
Lefebvre [132]给出了 Rosin-Rammler 分布中中位径参数与索太尔中径的一般关联式。对于 $s = 3.5$，表达式可简化为：

$$d_0 = 1.2726 d_{32}\left(1-\frac{1}{s}\right)^{1/s} \qquad (19.4.21)$$

至此，液滴的初始化工作就完成了。

压力－旋流雾化喷嘴模型

另一种重要的喷嘴类型就是压力－旋流雾化喷嘴。气体透平工业的人把它称作单相喷嘴（simplex atomizer）。这种喷嘴，然后流体通过一个称作旋流片的喷头被加速后，进入中心旋流室。在旋流室内，旋转的液体被挤压到固壁，在流体中心形成空气柱，然后，液体以不稳定的薄膜状态从喷口喷出，破碎成丝状物及液滴。在气体透平、燃油炉、直接喷射点火式汽车内燃机的液体燃料燃烧中，压力－旋流雾化喷嘴使用很广泛。液体从内部流到完全雾化的过程可分为三个步骤：液膜形成、液膜破碎及雾滴形成。这个过程的示意图如下：



图表 19.4.6 喷嘴内部流动转变为喷雾状态的理论步骤

空气与液膜间的相互作用机制目前还不甚清楚。一般认为，动力学的不稳定状态导致了液膜的破碎。下述的数学分析假定 Kelvin-Helmholtz 波在液膜上形成，并且最终导致了液膜破碎，形成线状碎片；然后，假定线状碎片由于表面张力不稳定机制而破碎形成液滴。一旦液滴形成之后，喷雾状态就由曳力、颗粒碰撞、合并以及二次破碎决定。

下面叙述的模型被称为线性不稳定液膜雾化模型（Linearized Instability Sheet Atomization —LISA)，此模型由 Schmidt 等人[206].发展而来。LISA 模型可分为两步：

1. 液膜形成
2. 液膜破碎与雾化

上述两部分均加以讨论。但下面的模型比 Schmidt et al. [206]的要改进一些。

液膜形成

喷嘴内液体的离心运动造成了液体薄膜包裹了空气柱的形状。薄膜厚度 t 与质量流率的关系为：

$$\dot{m} = p\,rut\left(d_{inj} - t\right) \qquad (19.4.22)$$

其中 d_{ij} 为喷口直径，$\dot{m}$ 为质量流量（由实验测得）方程 19.4-22 中的其他未知数是喷口速度的轴向分速度 u。它依赖于喷嘴内的具体形式，并且很难从理论计算得到。因而，我们使用的是 Han et al. [86]等人的近似方法。假定总速度与喷口压力的关系为：

$$U = k_v\sqrt{\frac{2\Delta p}{r_l}} \qquad (19.4.23)$$

Lefebvre [132]指出，k_v 是喷口形式及喷口压力的函数。若把旋流片看作喷嘴，方程 19.4-23 就可以看作是旋流片的流量系数表达式（假定压降主要集中在旋流片上)。对具有尖锐内缘、$\frac{L}{d}=4$ 的单相喷嘴，流量系数（C_d）的一般取值为 ≤ 0.78 [137]；对空穴喷嘴，C_d 值低至 0.61。所以，可以把 0.78 看作 k_v 的上界值。考虑到喷嘴内部的其余动量损失，把 k_v 降低 10% 就得到 k_v 的近似值为 0.7。

考虑到能量守恒，k_v 必须要小于 1，并且要大到足以保证有足够的质量流率。为确保中心空气柱尺寸非负，k_v 的表达式为；

$$k_v = \max\left[0.7, \frac{4\dot{m}}{pd_0^2 r_l \cos q}\sqrt{\frac{r_l}{2\Delta p}}\right] \qquad (19.4.24)$$

假定 Δp 已知，方程 19.4-23 **可用来计算 U，U 一旦确定之后，u 的计算式为：**

$$u = U\cos q \qquad (19.4.25)$$

其中，q 为假定已知的喷射角度。切向速度分量假定等于下游的径向速度分量。轴向速度分量假定不变。

液膜破碎与雾滴形成

压力－旋流雾化要受到周围气体、液体粘度以及液膜破碎时的表面张力的影响。Senecal et al. [207]**给出了详细的理论推导过程，我们只作大概介绍。在计算气－液相对速度时，忽略了气相速度，这样可以得到更精确、鲁棒性（计算性能好）更好的计算式。这样，我们就避免了在计算液滴物理量的时候，必须首先得到周围气相的速度。**

此模型假定二维、有粘、厚度为 $2h$ 的不可压液膜以速度 U 穿过静止、无粘不可压气体介质。液体与气体的密度分别为 r_l, r_g，液体粘度为 m_l。模型使用与液膜一起运动的运动坐标系，具有下面表达式的微扰动：

$$h = h_0 e^{ikx+wt} \qquad (19.4.26)$$

被作用到初始时处于稳定状态、由于运动而产生速度与压力的波动的气体与液体上。方程 19.4-26 **中，h_0 为初始波的幅值，$k = 2p/l$ 为波数，$w = w_r + iw_i$ 为复增长率。对于最不稳定的扰动，w_r 具有最大值，以 Ω 表示（假定是液膜破碎的主要原因）。这样，我们希望得到离散的表达式 $w = w(l)$，然后最不稳定的扰动就可以求得。**

Squire [229] and Hagerty and Shea [84]**得到了两个解，（或者说是两种模型）满足在上下气－液具备特定边界条件的液体控制方程。第一个模型称为正弦模型，认为上下界面的表面波同相位；第二个模型称为** varicose **模型，认为上下界面的表面波相位差为 p。许多学者的研究表明**(e.g., Senecal et al. [207])**，在低速和低气液密度比的情况下，正弦模型控制着表面波的增长速率。在高速流动时，两个模型给出的结果基本相同。因此，我们只讨论液膜的正弦波的增长。**

按照 Senecal et al. [207]**的推导，正弦模型中角频率的表达式为：**

$$w^2\left[\tanh(kh) + Q\right] + \left[4u_l k^2 \tanh(kh) + 2iQkU\right] + 4u_l k^4 \tanh(kh) - 4u_l^2 k^3 \ell \tanh(\ell h) - QU^2k^2 + \frac{sk^3}{r_l} = 0 \qquad (19.4.27)$$

其中 $Q = r_g / r_l, \ell^2 = k^2 + w/u_l$

从上式可知，如韦伯数大于某个临界值（$We = 27/16$ —基于气液相对速度、气相密度以及液薄厚度一半），快速增长波的波长较短；低于这个临界值，波长较大（与液薄厚度相比较）。目前的燃油喷嘴速度都比较大，所以。其液膜韦伯数一半都大于此临界值。

Li and Tankin [136]在静止坐标系中，应用线性分析得到类似于方程 19.4-27 的有粘液膜离散角频率表达式。这个表达式更一般化，关于此表达式在多维、压力旋流雾化模型的简化分析请参阅 Senecal et al. [207]。表面波的增长率表达式为：

$$w_r = \frac{1}{\tanh(kh)+Q}\left\{ -2u_l k^2 \tanh(kh) + \sqrt{ 4v_l^2 k^4 \tanh^2(kh) - Q^2 U^2 k^2 - \left[\tanh(kh)+Q\right]\left[-QU^2k^2 + \frac{s\,k^3}{r_l}\right] } \right\} \quad (19.4.28)$$

方程 19.4-27 推导到方程 19.4-28 过程中使用了两个主要假设。第一，在方程 19.4-28 中，对比于其他项，由无粘液膜一阶幅值分析得到的解表明，对比于方程 19.4.28 总的其它项，包含粘度二阶项可以忽略；第二，对于常见的喷嘴流动气液密度比 Q 在 10^{-3} 量级，因此可以认为 $Q << 1$。

由 Dombrowski and Johns 提出的液膜破碎的物理机制仅适用于长波。对于长波来说，一旦不稳定波达到某个临界值就认为它将破碎成为线状液膜。若在液膜破碎时，表面波的扰动发展到 h_b，那么，液膜的破碎时间 t 为：

$$h_b = h_0 e^{\Omega t} \Rightarrow \frac{1}{\Omega}\ln\left(\frac{h_b}{h_0}\right) \quad (19.4.29)$$

其中，Ω 为最大增长率，它可通过数值计算方法令方程 19.4-28（被看作 k 的函数）取最大值得到。用二分法检查函数的微分就可得到最大值。当液膜破碎成线状液膜时，其长度为：

$$L_b = U_t = \frac{U}{\Omega}\ln\left(\frac{h_b}{m_0}\right) \quad (19.4.30)$$

其中，$\ln\left(\frac{h_b}{h_0}\right)$ 为 3～12 的经验常数。这个值必须由用户设定，其缺省值为 12。

液膜破碎成线状液膜的半径可由质量平衡得到。若假定每个波长可形成一个线状液膜，那么，液膜的半径为：

$$d_L = \sqrt{\frac{8h}{K_s}} \quad (19.4.31)$$

其中 K_s 为对应于表面波最大增长率 Ω 的波数。线状液膜半径依赖于液膜厚度，而液膜厚度是液膜破碎长度的函数。液膜厚度由破碎长度和径向距离 r_0 确定：

$$h_{end} = \frac{r_0 h_0}{r_0 + L_b \sin\left(\frac{q}{2}\right)} \qquad (19.4.32)$$

这个机制不适用于短波。对于短波来说，线状液膜半径的确定比较简单。假定 d_L 与液膜破碎时的波长成线形比例关系。FLUENT 允许用户自行设定比例常数。波长有波数 K_s 计算得到。无论是长波还是短波，线状液膜破碎形成液滴的过程假定服从由 Weber's [257]分析得到的表面张力不稳定机制。变量 Oh 为由雷诺数和韦伯数组合得到的昂色格数（细节请参阅 19.4.3)。

$$d_0 = 1.88 d_L (1+3Oh)^{1/6} \qquad (19.4.33)$$

这个过程决定了液滴的最可几粒径。基于过去的模型经验[205]，分布指数假定为 3.5。用户必须设定喷射锥角度。喷射角度假定取为固定值 6°。

空气辅助雾化模型：

为了加速液膜的破碎，喷嘴经常会添加上辅助空气。液体通过喷座的作用形成液膜,空气则直接冲击液膜以加速液膜的破碎。这种雾化被称为空气辅助雾化或气泡（air-blast）迸裂雾化（依赖于空气量及其速度)。通过辅助空气的作用，可以得到更小的雾滴。这种提高雾化质量的作用机制并不清楚。一般的看法是，辅助空气加剧了液膜的不稳定性。同时，空气有助于液滴的分散,防止液滴间的碰撞。空气雾化喷嘴同压力－旋流雾化喷嘴一样被广泛应用，尤其是用在要求雾化粒径很小的场合。

FLUENT 中的空气雾化模型由压力－旋流雾化模型所衍生。有个不同点是，在空气辅助雾化模型里，用户需要直接设定液膜厚度。因为空气雾化喷嘴的液膜形成机制很多，所以必须要有此设定。这样，在空气辅助雾化喷嘴模型里就没有压力－旋流雾化模型里所具有的液膜形成方程（方程 19.4-22、19.4-25)。用户还必须设定液膜与空气间的最大速度差。尽管这个量可以计算出来，但设定一个值之后用户就可以不必计算喷嘴的内部流动了。这个特点对大区域（喷嘴相对很小）的流动模拟很方便。

另一个不同在于空气辅助雾化模型假定短波是液膜破碎的主要原因。作出这种假定的原因在于，人们发现空气辅助雾化喷嘴中液膜厚度较大。因此，液膜破碎成线状液膜的半径与液膜中快速增长波的波长成线性比例关系。

其他方面的设定与压力－雾化喷嘴模型的一样。用户必须设定质量流率和喷射角度。液膜离开喷口之后，它的初始轨道沿着设定的喷射角。如果初始液膜的轨道指向中心线，那么，喷射角度为负值。用户还需要设定喷口处液膜的内外半径。

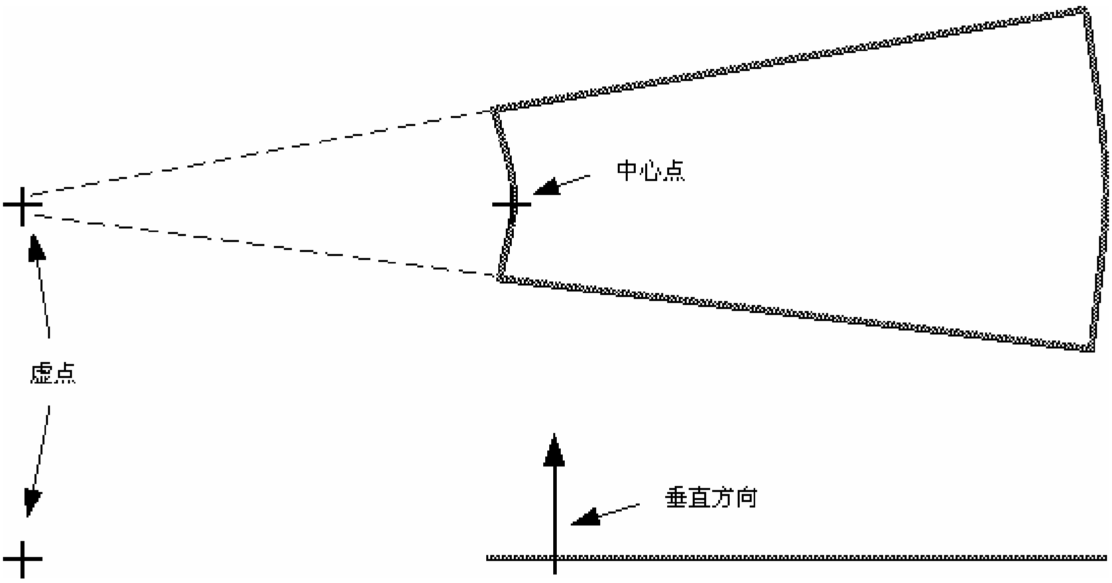
空气辅助雾化模型不包含内部气体的流动。在 FLUENT 中，用户必须把喷嘴内的空气流动设定为边界条件。空气流动可看作一般的连续相的流动，不需要做特别的处理。

转杯雾化模型（The Flat-Fan Atomizer Model)

转杯雾化喷嘴与压力－旋流雾化喷嘴很类似，只是它形成了液膜层，而不是旋流。液体从宽而薄的喷口出来后形成平面液膜，继而破碎成液滴。一般认为，它的雾化机理与压力－旋流雾化喷嘴类似。一些学者认为转杯雾化喷嘴（由冲击射流雾化而来）的雾化机理与平面液膜的雾化类似。在这种情况下，转杯雾化模型可以应用。

只有在三维的情况下才可以使用这个模型。图 19.4.6 是一个转杯的三维示意图。此模型假定扇叶由一个虚点延长而成。用户必须设定虚点的位置，虚点就是扇叶的侧边的延长线的交点。

用户还必须设定扇叶的弧边所对应的中心点。为了确定喷射的方向，FLUENT 将由虚点和中心点的位置来确定一个向量。用户还必须设定扇叶弧的半顶角、喷口宽度（垂直方向）以及液体的质量流率。



图表 19.4.7 平板扇叶喷嘴顶视图与侧视图

平板扇叶的液膜破碎计算与压力－旋流喷嘴液膜的计算类似。二者都是液膜破碎生成线状液膜，然后形成液滴。唯一的区别在于对于短波，平板扇叶喷嘴形成的线状液膜以半个波长为界限（即，达到半个临界波长，液膜就破碎成线状液膜了）。因此，短波所形成的线状液膜的半径是：

$$d_L = \sqrt{\frac{16h}{K_s}} \qquad (19.4.34)$$

Rosin-Rammler 分布指数假定为 3.5，分散角设定为 6 。在其他方面，平板扇叶喷嘴雾化模型与压力－旋流雾化喷嘴的液膜破碎机理相同。

气泡雾化模型

气泡雾化喷嘴中，液体中混合了过热液体（相对下游工况）或者类似的介质。当挥发性液体从喷口喷出时，迅速发生相变。相变使流体迅速以很大的分散角破碎成小液滴。此模型也适用于热流体射流。

由于对气泡雾化的机理不甚清楚，模型必须依赖于实验拟合结果。Reitz [189]的摄影图片对此提供了一些基本的认识。图片显示，在气泡雾化时，中心是密相液体核，周围则是小液滴群。

液滴的初始速度由质量守恒计算得到。假定喷口截面积为 C_{ct} 乘以喷口面积，其中，C_{ct} 是由用户设定的常数：

$$u = \frac{\dot{m}}{r_l C_{ct} A} \qquad (19.4.35)$$

最大液滴直径设定为喷口的有效直径：

$$d_{\max} = d\sqrt{C_{ct}} \qquad (19.4.36)$$

然后对液滴的 Rosin-Rammler 分布（分布指数取为 4.0，细节请参阅 1.9.7）采样就得到液滴的直径。最可几液滴粒径依赖于液滴的随机轨道与喷射方向之间的夹角：

$$d_0 = d_{\max} e^{-(q/\Theta_s)^2} \qquad (19.4.37)$$

分散角的乘子，Θ_s 由量 x 和用户设定的分散常数 C_{eff} 计算得到：

$$\Theta_s = \frac{x}{C_{eff}} \qquad (19.4.38)$$

这种设定形成的射流的中心为大粒径液滴，而周围为小粒径液滴。液滴的初始温度设定为液滴的饱和温度乘以初始温度分数 f 。因为液滴的温度接近于沸点温度，所以 f 稍小于 1.0。

计算中还必须设定蒸发的气体，此蒸汽是连续相的一部分而不是分散相模型所要处理的。在设定连续相的边界条件时，用户必须在喷口处设定一个连续相的入口边界条件。

若选择气泡雾化模型，还需要设定喷口直径、质量流率、混合量、挥发分物质的饱和温度、温度分数、射流半角以及分散常数。

19.4.2 液滴碰撞模型

概述

在模拟中要跟踪非稳态液滴，FLUENT 可用一个有效的计算方法来估计碰撞液滴数及其碰撞结果。碰撞计算的困难在于，对于 N 个颗粒，与每个颗粒可能发生碰撞的颗粒数是 $N-1$。这样，可能发生的颗粒碰撞次数就是 $\frac{1}{2}N^2$（系数 $\frac{1}{2}$ 表示每次发生的碰撞的两个颗粒被重复计算，故碰撞总次数要除以二）。

要知道的是，对于每个时间步，都要计算 $\frac{1}{2}N^2$ 次可能发生的碰撞。而每次射流形成的雾化颗粒是数百万，所以，这种计算方法不可行。于是，颗粒组的概念就产生了。颗粒组在统计意义上代表了一群颗粒。例如，如果 FLUENT 跟踪一群颗粒组，而每个颗粒组代表 1000 个颗粒，那么，碰撞的计算量就减少了 6 个数量级。碰撞计算量与 N 的平方成正比，于是，总计算量的减少就很可观了。即使这样，计算这么多的颗粒组仍然耗费很大的计算量。

O'Rourke [168] 的方法有效减少了颗粒碰撞的计算量。它不是从几何角度考虑看是否颗粒组的轨道有重叠（同一时刻），而是用随机的方法来估计碰撞（频率）。而且还假定只有颗粒组同存于一个流体网格内，碰撞才可能发生。这两个假设只有当流体网格与喷雾尺寸相比较小时才有效。这种情况下，v 的方法在估计碰撞的发生频率上具有二阶精度。颗粒组的处理以及 O'Rourke 的计算方法使得实际射流问题中颗粒的碰撞计算成为可能。

一旦两个颗粒组发生碰撞，计算格式需要确定碰撞类型。只考虑颗粒合并与反弹。每次碰撞的概率结果碰撞由韦伯数及实验数据的拟合通过计算得到。发生碰撞的一对颗粒组的性质由碰撞计算结果再加以修正。

模型的使用及其限制

碰撞模型假定碰撞发生的频率远小于颗粒计算的时间步长。如果时间步长太大，计算结果将依赖于此时间步长，用户必须相应的调整颗粒的长度标尺（特征尺度）。此外，此模型比较适合于低韦伯数碰撞，在这种情况下碰撞的结果是合并或反弹，而当韦伯数大于 100 时，碰撞将引起液滴的破碎。

有时，射流雾化模拟的结果会发生依赖于网格尺度的假象。这是由于假定液滴碰撞只会发生在同一个计算网格之内。当射流点源处于网格节点时，很可能就发生此种情况。液滴的合并

倾向于使射流偏离计算网格的边界。在二维情况下，采取细密的网格和颗粒数可以减少这种假象的发生。在三维情况下，使用极坐标形式的计算网格，把射流源放在极点可以得到很好的计算结果。

模型理论

如上所述，O'Rourke's 的计算方法假定两个颗粒之间的碰撞只能在同一个连续相的计算网格内发生。这种假定使得不在同一个计算网格内但非常接近的两个颗粒不再发生碰撞。这种误差却因为使得同一计算网格内相距较远的颗粒发生碰撞而被抵消一部分。这种计算方法在空间上具有二阶精度。

碰撞概率

两个颗粒发生碰撞的概率是从大颗粒的角度来研究的，大颗粒被称为集合液滴（collector droplet）管，下面的推导中以 1 表示；小液滴则以 2 表示。计算时坐标系固定在大颗粒上，这样，大颗粒的速度等于零。在推导中，只有两种颗粒间的相对距离是重要的。如果小颗粒与集合颗粒发生碰撞，那么，其轨迹半径就是$r_1 + r_2$。更可能的情况是，若小液滴中心穿过垂直颗粒轨道方向的一个具有面积为$p\left(r_1 + r_2\right)^2$的大颗粒的集合液滴管形成的平面圆盘时，就会发生碰撞。这个圆盘可用来定义一个碰撞体积，即前面提到的圆盘面积乘以小液滴在一个时间步运动距离，$p\left(r_1 + r_2\right)^2 v_{rel}\Delta t$。

O'Rourke 的方法用碰撞体积的概念来计算碰撞概率。此方法计算小液滴在碰撞体积内的概率，而不是看是否小液滴轨迹中心线的位置处在碰撞体积内。大家都知道，小液滴在一个连续相的计算网格 V 内可能处在任何位置。若在网格内液滴的位置分布为均匀分布，那么，小液滴在碰撞体（积）内被发现的概率为：

$$P_1 = \frac{p\left(r_1 + r_2\right)^2 v_{rel}\Delta t}{V} \qquad (19.4.39)$$

方程 19.4-39 可对颗粒组一般表出，相应的在集合液滴管和小液滴组中分别存在n_1, n_2个液滴。集合液滴管中碰撞发生率的数学期望为：

$$\bar{n} = \frac{n_2 p\left(r_1 + r_2\right) v_{rel}\Delta t}{V} \qquad (19.4.40)$$

在集合液滴管内发生的实际碰撞次数并不是此数学期望值。根据 O'Rourke 的理论，碰撞次数的概率分布服从泊松分布：

$$P(n) = e^{-\bar{n}}\frac{\bar{n}^n}{n!} \qquad (19.4.41)$$

其中，n 为集合液滴管与其它液滴的碰撞数。

碰撞结果

一旦两个液滴发生碰撞，就需要确定碰撞的结果。一般说来，如果是正碰的情况，结果倾向于液滴的合并；如果是侧碰，则倾向于反弹。临界值是碰撞韦伯数及集合液滴管与小液滴的半径的函数。

O'Rourke 得到的临界值的表达式为：

$$b_{crit} = (r_1 + r_2)\sqrt{\min\left(1.0, \frac{2.4f}{We}\right)} \qquad (19.4.42)$$

其中 f 为 r_1 / r_2 的函数，定义为：

$$f\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3 - 2.4\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + 2.7\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \qquad (19.4.43)$$

实际碰撞的参数 b 的值为 $(r_1 + r_2)\sqrt{Y}$，其中 Y 为平均偏差。b 的计算值与 b_{crit} 相比较，若 $b < b_{crit}$，碰撞的结果是液滴的合并。方程 19.4-41 给出了小液滴与集合液滴管的发生合并的液滴数。合并后液滴的性质由基本守恒定律计算得到。在侧碰情况下，碰撞后液滴的速度由动量和动能守恒定律计算得到。假定动能的一部分损失而转化为粘性耗散以及生成角动量。损失的比例与碰撞距离参数 b 相关联。使用这种能量损失假设，O'Rourke 推导出碰撞后的速度表达式为：

$$v_1' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 + m_2(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2}\left(\frac{b - b_{crit}}{r_1 + r_2 - b_{crit}}\right) \qquad (19.4.44)$$

上式可用于速度的各个分量。侧碰过程中，其它的物理量不发生变化。

19.4.3 喷雾雾滴破碎模型

FLUENT 提供两种雾滴破碎模型：泰勒类比破碎（TAB）模型和波致破碎模型。TAB 模型适合低韦伯数射流雾化以及低速射流进入标态空气中的情况。对韦伯数大于 100 的情况，波动模型适应性较好。在高速燃料射流雾化中，波动模型应用甚广。两种模型的细节分述如下。

TAB 模型

概述

TAB 模型是计算液滴破碎的经典方法，它被应用于多种工程射流计算中。这种方法来源于在弹簧质量系统与液滴振荡、变形之间进行的泰勒类比[239]。表 19.4.3 列出了两者各个属性的类比：

表格 3 弹簧质量系统与液滴变形之间的类比

弹簧质量系统	液滴变形与振荡
弹簧恢复力	表面力
外力	液滴所受曳力
阻尼力	液滴粘性力

对控制液滴振荡与变形的 TAB 模型方程进行求解就可得到任一时刻液滴的振荡与变形。如下所述，当液滴的振荡达到某一临界值之后，“父”液滴将破碎形成“子”液滴。当液滴由球形变为其它形状时，液滴的曳力系数将发生变化。在 FLUENT 中，液滴形状改变引起的曳力系数的变化可以通过计算得到。细节请参阅 19.4.4。

模型的使用与限制

TAB 模型最适合于低韦伯数的射流雾化。韦伯数很大时，雾滴就会破碎，此时，弹簧比拟就不再适合了。

液滴变形

受迫、有阻尼振动的控制方程为[169]：

$$F - kx - d\frac{dx}{dt} = m\frac{d^2x}{dt^2} \qquad (19.4.45)$$

其中，x 为实际液滴的赤道与当其为球形时的赤道二者之间的位移量。方程的系数来源于泰勒类比：

$$\frac{F}{m} = C_F \frac{r_g u^2}{r_l r} \qquad (19.4.46)$$

$$\frac{k}{m} = C_k \frac{s}{r_l r^3} \qquad (19.4.47)$$

$$\frac{d}{m} = C_d \frac{m_l}{r_l r^2} \qquad (19.4.48)$$

其中，r_l, r_g 分别为分散相与连续相的密度，u 为液滴的相对速度，r 为未发生变形前的液滴的半径，s 为液滴表面张力，m_l 为液滴粘度。无量纲常数 C_F, C_k, C_d 在后面定义。

假定液滴破碎时，其变形增长到液滴半径的某个临界比值。在液滴发生破碎时有：

$$x > C_b r \qquad (19.4.49)$$

其中，C_b 为等于 0.5 的常数。这相当于假定变形达到液滴半径时（即，液滴的南北极在液滴中心相接）发生破碎。这种假定意味着液滴的破碎仅由一种振型（基本振型，相当于基频率对应的振型）决定。设 $y = x/(C_b r)$，方程 19.4-45 可转化为无量纲形式，然后把方程 19.4-46，19.4-48 的关系式代入，有：

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{C_F}{C_b}\frac{r_g}{r_l}\frac{u^2}{r^2} - \frac{C_k s}{r_l r^3} y - \frac{C_d m_l}{r_l r^2}\frac{dy}{dt} \qquad (19.4.50)$$

其中，当 $y > 1$ 时，液滴发生破碎。对于无阻尼液滴，若假定相对速度不变，y 可由其控制方程 19.4-50 解出：

$$y(t) = We_c + e^{-(t/t_d)}\left[(y_0 - We_c)\cos(wt) + \frac{1}{w}\left(\frac{dy_0}{dt} + \frac{y_0 - We_c}{t_d}\right)\sin(wt)\right] \qquad (19.4.51)$$

其中：

$$We = \frac{r_g u^2 r}{s} \qquad (19.4.52)$$

$$We_c = \frac{C_F}{C_k C_b} We \qquad (19.4.53)$$

$$y_0 = y(0) \qquad (19.4.54)$$

$$\frac{dy_0}{dt}=\frac{dy}{dt}(0) \qquad (19.4.55)$$

$$\frac{1}{t_d}=\frac{C_d}{2}\frac{m_l}{r_l r^2} \qquad (19.4.56)$$

$$w^2=C_k\frac{s}{r_l r^3}-\frac{1}{t_d^2} \qquad (19.4.57)$$

方程 19.4-51 中，u 为液滴与气相间的相对速度，We 为液滴韦伯数，此无量纲准数定义为液滴所受到的气动力（曳力）与表面张力的比值。液滴的振荡频率由 w 表示。常数由实验数据及理论推导得到：

$$C_k=8$$

$$C_d=5$$

$$C_F=\frac{1}{3}$$

若方程 19.4-51 的求解对象为所有液滴，那么，当 $y>1$ 就假定液滴发生破碎。于是，新形成的子液滴的尺寸与速度就必须要确定下来。

子液滴尺寸

令“父”液滴的能量等于“子”液滴的各种能量之和就可以求得“子”液滴的尺寸。“父”液滴的能量为：

$$E_{parent}=4pr^2 s+K\frac{p}{5}r_l r^5\left[\left(\frac{dy}{dt}\right)^2+w^2y^2\right] \qquad (19.4.58)$$

其中，K 为液滴的变形与振动能量与基频总能的比值，此值为 $\left(\frac{10}{3}\right)$ 左右。子液滴假定不存在变形与振荡。于是，子液滴的能量为：

$$E_{child}=4pr^2 s\frac{r}{r_{32}}+\frac{p}{6}r_l r^5\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 \qquad (19.4.59)$$

其中，r_{32} 为液滴尺寸分布的索太尔中径。通过令父液滴的能量等于子液滴的能量（即方程 19.4-58，19.4-59），并且设 $y=1, w^2=8s/r_l r^3$，r_{32} 的表达式为：

$$r_{32}=\frac{r}{1+\frac{8Ky^2}{20}+\frac{r_l r^3(dy/dt)^2}{s}\left(\frac{6K-5}{120}\right)} \qquad (19.4.60)$$

一旦子液滴的尺寸求出之后，通过质量平衡就得到了子液滴的数目。

子液滴的速度

TAB 模型允许子液滴存在垂直于父液滴速度的速度分量。破碎发生时，父液滴的赤道处的速度为 $dx/dt = C_b r(dy/dt)$。因此，子液滴的垂直于父液滴速度的速度分量为：

$$v_{normal} = C_v C_b r \frac{dy}{dt} \qquad (19.4.61)$$

其中，C_v 为常数（1 的量级）。尽管这个速度分量被假定位于垂直父液滴速度的平面内，但在这个垂直平面内，速度分量指向何方并不确定。所以，子液滴的垂直速度指向是在此垂直平面内随机选择的。

液滴破碎

为了模拟液滴破碎现象，TAB 模型首先确定无阻尼振荡情况下，在第 n 个时间步的振幅为：

$$A = \sqrt{\left(y^n - We_c\right)^2 + \left(\frac{(dy/dt)^n}{w}\right)^2} \qquad (19.4.62)$$

由方程 19.4-62，液滴破碎时，必有：

$$We_c + A > 1 \qquad (19.4.63)$$

这种情况的发生很少，因为阻尼的存在值的液滴破碎的机率减少。若液滴达不到上述标准，就不会发生破碎。唯一需要另外计算的是用方程 19.4-51 的差分离散格式以及相应的微分离散格式来更新 y 值。这些步骤都是基于 O'Rourke and Amsden [169]:的研究：

$$y^{n+1} = We_c + e^{-(\Delta t/t_d)}\left\{\left(y^n - We_c\right)\cos(wt) + \frac{1}{w}\left[\left(\frac{dy}{dt}\right)^n + \frac{y^n - We_c}{t_d}\right]\sin(wt)\right\} \qquad (19.4.64)$$

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)^{n+1} = \frac{We_c - y^{n+1}}{t_d} + we^{-(\Delta t/t_d)}\left\{\frac{1}{w}\left[\left(\frac{dy}{dt}\right)^n + \frac{y^n - We_c}{t_d}\right]\cos(w\Delta t) - \left(y^n - We_c\right)\sin(w\Delta t)\right\} \qquad (19.4.65)$$

上述表达式中，所有的常数在一个时间步内均假定不发生变化。

如果达到方程 19.4-63 所示的临界值，就会发生破碎。必须确定破碎时间 t_{bu} 以看是否在一个时间步长 Δt 内发生破碎现象。t_{bu} 的值为液滴的振荡增长到液滴变形 y 达到 1 时所经历的时间。破碎时间的计算是假定液滴振动在第一个周期内无阻尼。所以，破碎时间就是无阻尼振动方程 19.4-51 中大于 t^n 的时间值的平方根：

$$We_c + A\cos\left[w\left(t - t^n\right) + f\right] = 1 \qquad (19.4.66)$$

其中：

$$\cos f = \frac{y^n - We_c}{A} \qquad (19.4.67)$$

$$\sin f = -\frac{(dy/dt)^n}{Aw} \qquad (19.4.68)$$

如果$t_{bu} > t^{n+1}$,那么,在当前时间步内不会发生破碎,并且 $y, (dy/dt)$ 由方程 19.4-64、19.4-65 得到更新。然后再计算下一个液滴。相反，若 $t^n < t_{bu} < t^{n+1}$，液滴就会破碎，子液滴的半径由方程 19.4-60 计算得到。子液滴的数目N 由质量守恒得到：

$$N^{n+1} = N^n \left(\frac{r^n}{r^{n+1}} \right)^3 \qquad (19.4.69)$$

子液滴的速度方向垂直于相对速度向量，速度幅值由方程 19.4-61 计算得到。子液滴假定即无变形也无振荡，即 $y = (dy/dt) = 0$。

液滴的破碎过程适用于液滴组（液滴组的细节请参阅 19.4.2）内的所有液滴。这样，就不需要再对破碎后形成的液滴加以计算。FLUENT 中的 TAB 模型只改变当前液滴的质量、尺寸和速度值。

波动破碎模型

概述

另一个雾滴破碎模型是的 Reitz [188]波动破碎模型,此模型认为气－液之间的速度差造成了射流雾滴的破碎。破碎时间及破碎后液滴的尺寸与快速增长的 Kelvin-Helmholtz 不稳定表面波相关联，其联系由下述的射流稳定性分析得到。不稳定表面波的波长及增长率用来预测新形成液滴的属性。

模型使用与限制

波动模型适用于高速射流雾化，一般认为，在这种情况下（$We > 100$），Kelvin-Helmholtz 是雾滴破碎的主要原因。因为破碎会增加所要计算的液滴数目，所以，用户最好还是减少射流中的雾滴数。用户还必须设定模型常数（一般都依赖于喷嘴的内部流动）。

射流稳定性分析

射流稳定性分析的详细推导可参见 Reitz 和 Bracco [187]。下面仅简要述之。稳定性分析的对象是半径为 a 的圆射流以速度 v 从喷口喷出，进入静止、不可压、无粘、具有密度 r_2 的气体中。液体的密度为 r_1，粘度为 m_1，坐标系取为随射流一起运动的运动坐标系。假定在初始稳定运动的基础上有一无限小轴对称表面位移：

$$h = h_0 e^{ikz + wt} \qquad (19.4.70)$$

这样，与增长率的实部（w）相联系的圆频率与波数（$k = 2p / l$）之间存在离散形式的函数关系 $w = w(k)$。

为了确定这种离散关系式，用三角级数解求解液体的线性化之后的水力学方程有：

$$f_1 = C_1 I_0(kr) e^{ikz + wt} \qquad (19.4.71)$$

$$y_1 = C_2 I_1(Lr) e^{ikz + wt} \qquad (19.4.72)$$

其中，f_1, y_1 分别为速度势和流函数；C_1, C_2 为积分常数；I_0, I_1 为第一类修正贝塞尔函数；$L^2 = k^2 + w / n_1$ ，n_1 为液体运动粘度[188]。液体压力由方程的无粘部分计算而来。此外，

求解无粘气体方程可得到当 $r = a$ 时的波动压力：

$$-p_{21} = -r_2 (U - iwk)^2 kh \frac{K_0(ka)}{K_1(ka)} \qquad (19.4.73)$$

其中 K_0, K_1 为第二类修正贝塞尔函数，为气－液之间的相对速度。线性化边界条件为：

$$n_1 = \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (19.4.74)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial r} = -\frac{\partial v_1}{\partial z} \qquad (19.4.75)$$

$$-p_1 + 2m_1 - \frac{s}{a^2}\left(h + a^2 \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) + p_2 = 0 \qquad (19.4.76)$$

上面三式分别表示的是自由表面的运动连续条件、剪应力连续和正应力连续条件。需要注意的是，u_1 为液体轴向扰动速度，v_1 径向扰动速度，s 为表面张力。方程 19.4-75 假定 $v_2 = 0$。正如 Reitz [188]所描述的，方程 19.4-74，19.4-75 可用来消去方程 19.4-72 中的积分常数 C_1, C_2。这样，把压力和速度解代入方程 19.4-76 中，离散关系式则为：

$$w^2 + 2n_1 k^2 w\left[\frac{I_1'(ka)}{I_0(ka)} - \frac{2kL}{k^2 + L^2}\frac{I_1(ka)}{I_0(ka)}\frac{I_1'(La)}{I_1(La)}\right] =$$

$$\frac{sk}{r_1 a^2}\left(1 - k^2 a^2\right)\left(\frac{L^2 - a^2}{L^2 + a^2}\right)\frac{I_1(ka)}{I_0(ka)} + \frac{r_1}{r_2}\left(U - i\frac{w}{k}\right)^2\left(\frac{L^2 - a^2}{L^2 + a^2}\right)\frac{I_1(ka)}{I_0(ka)}\frac{K_0(ka)}{K_1(ka)} \qquad (19.4.77)$$

正如 Reitz [188]所陈述的，对于一个给定的流动工况，方程 19.4-77 可求得最大增长率（或者称为最不稳定波）。通过数值解的曲线拟合，Reitz [188]:给出了方程 19.4-77 的最大增长率 Ω 及相应的波长 Λ ：

$$\frac{\Lambda}{a} = 9.02 \frac{\left(1 + 0.45 Oh^{0.5}\right)\left(1 + 0.4 Ta^{0.7}\right)}{\left(1 + 0.87 We_2^{1.67}\right)^{0.6}} \qquad (19.4.78)$$

$$\Omega\left(\frac{r_1 a^3}{s}\right) = \frac{\left(0.34 + 0.38 We_2^{1.5}\right)}{(1 + Oh)\left(1 + 1.4 Ta^{0.6}\right)} \qquad (19.4.79)$$

其中，$Oh = \sqrt{We_1} / \mathrm{Re}_1$ 为昂塞格数，泰勒数 $Ta = Oh\sqrt{We_2}$。此外，$We_1 = r_1 U^2 a / s$, $We_2 = r_2 U^2 a / s$ 分别为液体与气体的韦伯数；$\mathrm{Re}_1 = Ua / n_1$ 为雷诺数。

液滴破碎

波动模型中，初始雾滴组直径（较大的射流雾滴）由上述的射流稳定性分析得到。液滴组破碎后形成小液滴，其半径 a 通过假定破碎时的液滴半径 r 与快速增长表面波的波长（控制方程为 19.4-78）成比例计算得到。换句话说：

$$r = B_0 \Lambda \qquad (19.4.80)$$

其中，B_0 模型常数，由 Reitz [188]的研究工作确定其值为 0.61。父液滴的半径变化率为：

$$\frac{da}{dt} = -\frac{(a-r)}{t}, r \le a \qquad (19.4.81)$$

其中，破碎时间 t 为：

$$t = \frac{3.726 B_1 a}{\Lambda\Omega} \qquad (19.4.82)$$

Λ, Ω 由方程 19.4-78 和 19.4-79 计算得到。破碎时间常数 B_1 与初始射流的湍流程度相关联，并且不同的喷嘴，其取值不同[118]。

19.4.4 动态曳力模型

为了更精确的模拟雾化过程，液滴的曳力系数的精确程度很关键。FLUENT 中可以依赖于液滴形状的变化以动态形式确定曳力系数。

适用于限制

动态曳力模型几乎可以用于任一场合。即包括 TAB 模型，也包括波动模型。当激活碰撞模型后，碰撞决定了过程发生之后的液滴变形与变形速度。

理论

多数液滴液力模型假定在整个流动区域内保持为球形。此种情形下，球形物体的曳力如下[142]：

$$C_{d,sphere} = 0.424 \qquad \mathrm{Re} > 1000$$

$$C_{d,sphere} = \frac{24}{\mathrm{Re}}\left(1 + \frac{1}{6}\mathrm{Re}^{2/3}\right) \qquad \mathrm{Re} \le 1000 \qquad (19.4.83)$$

然而，当韦伯数较大时，液滴在气相内运动过程中，其形状将由初始的球形显著变化为非球形。极端情况下，液滴的形状将变化为盘状。盘形物的曳力明显高于球形物的受到的曳力。由于液滴的曳力系数严重依赖于液滴的形状，假定液滴为球形的液力模型当然就不甚合适了。动态曳力模型考虑到液滴变形的影响，其曳力值在球形物体的曳力值（方程 19.4-83）与 1.52（对应圆盘物体[142]）之间线性变化。曳力系数的表达式为：

$$C_d = C_{d,sphere}(1 + 2.632 y) \qquad (19.4.84)$$

其中 y 为液滴的变形值，由下式确定：

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{C_F}{C_b}\frac{r_g}{r_l}\frac{u^2}{r^2} - \frac{C_k s}{r_l r^3} y - \frac{C_d m_l}{r_l r^2}\frac{dy}{dt} \qquad (19.4.85)$$

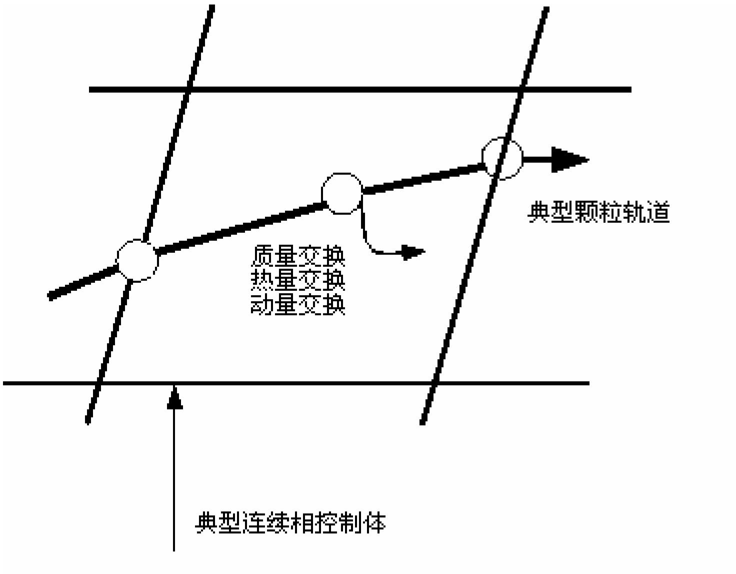
在没有变形（$y = 0$）的极限情况，就得到了球形物的曳力系数值；当达到最大变形值（$y = 1$）时，就得到了圆盘的曳力系数。

需要注意的是方程 19.4-85 是由雾滴破碎的 TAB 模型（细节请参阅 19.4.3）而来，但动态液力模型可用于任一种破碎模型。

19.5 离散相与连续相间的耦合

当计算颗粒的轨道时，FLUENT 跟踪计算颗粒沿轨道的热量、质量、动量的得到与损失，这些物理量可作用于随后的连续相的计算中去。于是，在连续相影响离散相的同时，用户也

可以考虑离散相对连续相的作用。交替求解离散相与连续相的控制方程，直到二者均收敛（二者计算解不再变化）为止，这样，就实现了双向耦合计算。图 19.5.1 示意了两相之间的热量、质量与动量间的交换。



图表 8 离散相与连续相之间的热量、质量与动量的交换

动量交换

在 FLUENT 中，当颗粒穿过每个 FLUENT 模型的控制体时，通过计算颗粒的动量变化来求解连续相传递给离散相的动量值。颗粒动量变化值为：

$$F=\sum\left(\frac{18\beta\mu C_D \mathrm{Re}}{\rho_p d_p^2 24}\left(u_p-u\right)+F_{other}\right)\dot{m}_p\Delta t \qquad (19.5.1)$$

其中：

μ = 流体粘度

ρ_p = 颗粒密度

d_p = 颗粒直径

Re = 相对雷诺数

u_p = 颗粒速度

u = 流体速度

C_D = 曳力系数

$\dot{m}_p$ = 颗粒质量流率

Δt = 时间步长

F_{other} = 其它相间作用力

这个动量交换作为动量 “ 汇 ” 作用到随后的流体相动量平衡计算中，并且 FLUENT 可以输出这个动量汇的数值（细节请参阅 19.13）。

热量交换

在 FLUENT 中，当颗粒穿过每个 FLUENT 模型的控制体时，通过计算颗粒的热量变化来求解连续相传递给离散相的热量值。当不存在化学反应时（即，颗粒定律 5 不适用时），热量交换的计算式为：

$$Q=\left[\frac{\overline{m_p}}{m_{p,0}}c_p\Delta T_p+\frac{\Delta m_p}{m_{p,0}}\left(-h_{fg}+h_{pyrol}+\int_{T_{ref}}^{T_p}c_{p,i}dT\right)\right]\dot{m}_{p,0} \qquad (19.5.2)$$

其中：

$\dot{m}_p$ =控制体内的颗粒平均质量（kg）

$m_{p,0}$ =颗粒初始质量（kg）

c_p =颗粒比热容（$J/kg-K$）

ΔT_p =控制体内颗粒的温度变化（K）

Δm_p =控制体内颗粒的质量变化（kg）

h_{fg} =挥发分析出潜热（J/kg）

h_{pyrol} =挥发分析出时热解所需热量（J/kg）

$c_{p,i}$ =析出挥发分的比热（$J/kg-K$）

T_p =离开控制体颗粒的温度（K）

T_{ref} =焓所对应的参考温度（K）

$\dot{m}_{p,0}$ =跟踪颗粒的初始质量流率（kg/s）

这个热量交换作为热量“汇”作用到随后的流体相热量平衡计算中，并且 FLUENT 可以输出这个热量汇的数值（细节请参阅 19.13）。在使用定律 5 的情形下，类似的方程决定着热量交换，在这种情况下，表面燃烧生成的热量需要计算考虑。

质量交换

在 FLUENT 中，当颗粒穿过每个 FLUENT 模型的控制体时，通过计算颗粒的质量变化来求解连续相传递给离散相的质量值。颗粒质量变化值可简写为：

$$M=\frac{\Delta m_p}{m_{p,0}}\dot{m}_{p,0} \qquad (19.5.3)$$

这个质量交换作为质量“源”作用到随后的流体相质量平衡计算中，同时又作为某一化学组分的组分“源”作用于组份方程，并且 FLUENT 可以输出这个质量源的数值（细节请参阅 19.13）。

相间交换项的亚松弛

需要注意的是相间的动量、热量、质量交换是按亚松弛格式计算的，因此，有：

$$F_{new} = F_{old} + \alpha \left(F_{calculated} - F_{old} \right) \qquad (19.5.4)$$

$$Q_{new} = Q_{old} + \alpha \left(Q_{calculated} - Q_{old} \right) \qquad (19.5.5)$$

$$M_{new} = M_{old} + \alpha \left(M_{calculated} - M_{old} \right) \qquad (19.5.6)$$

其中α 为颗粒／液滴的亚松弛系数，用户可在 Solution Controls panel.面板里设定。α 的缺省值为 0.5。为了改进耦合计算的收敛性，用户可减小松弛系数。需要注意的是α 值的大小并不影响最终收敛解所预报出的结果。

随机跟踪中的相间交换量的计算

当激活随机跟踪（stochastic tracking）选项时，对每一个随机轨道都用方程 19.5-1，19.5-2 进行计算，但计算式中的质量流率 $\dot{m}_{p,0}$ 要除以总的随机轨道数目。这意味着对每一个随机轨道，其颗粒质量流率相等。

颗粒群模型总的相间交换量的计算

当激活颗粒群模型（particle cloud）选项时，相间交换项的计算仍然使用方程 19.5-1 和 19.5-6，但计算所用到的流动物理量是基于颗粒群的系综平均量。计算得到的交换项按照方程 19.2-61 定义的加权系数分配到颗粒群所在的各个计算网格内。

19.6 离散相模型使用概述

下面简要叙述涉及到离散相的设定、计算步骤。细节请参阅 19.7-19.13**。这里只介绍涉及到离散相模型的相关步骤。若要了解与离散相耦合计算时所涉及到的其它模型中所要求的输入信息，请参阅与那些模型相关的部分。**

1 **按** 19.7 **节所叙述的方法激活任一与离散相相关的模型。**

2 **若使用非稳态颗粒跟踪模型，请按** 19.8 **节所叙述的方法定义非稳态参数**

3 **按** 19.9 **节所叙述的方法设定初始条件**

4 **按** 19.10 **节所叙述的方法设定边界条件**

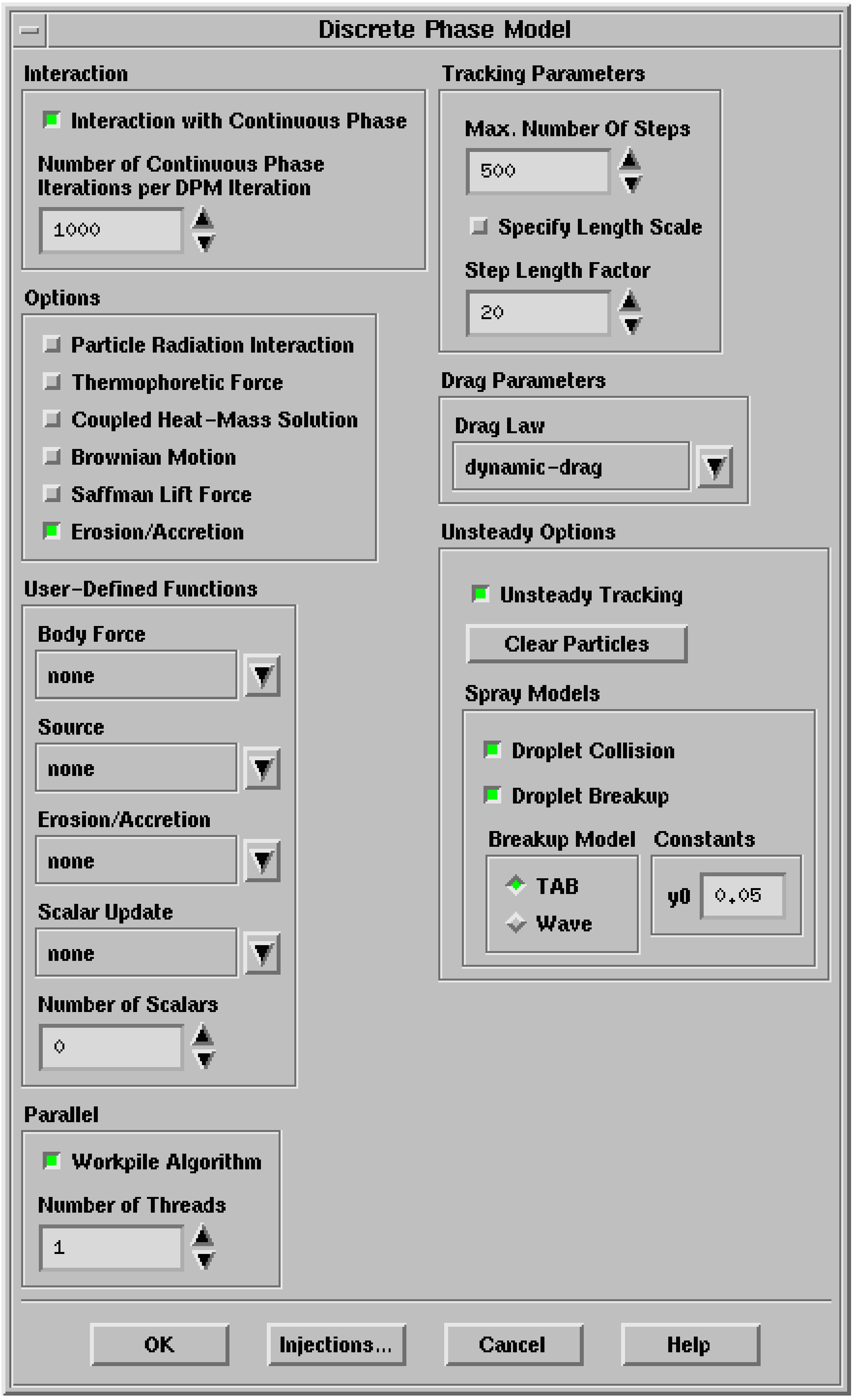
5 **按** 19.11 **节所叙述的方法设定介质属性**

6 **按** 19.8 **节所叙述的方法查看结果**

19.7 离散相模型选项

这一节介绍 FLUENT **中可选的离散相模型的使用方法。在离散相面板（Discrete Phase Model）里可激活下述的所有选项。**

Define → Models → Discrete Phase...



图表 19.7.9 离散相模型面板

19.7.1 考虑颗粒热辐射

如果要考虑颗粒的热辐射效应（方程 11.3-20），用户必须在离散相模型面板里激活颗粒辐射选项（Particle Radiation Interaction）。用户还必须如 19.11.2 节所述的方法设定颗粒属性的其它性质（发射率、散射率）。只有选择了 $P-1$ 模型或离散发射模型时才具有此选项。

19.7.2 考虑颗粒的热泳力

如果要考虑颗粒的热泳力（方程 19.2-14），用户必须在离散相模型面板里激活颗粒辐射选项

（Particle Radiation Interaction）。用户还必须如 19.11.2 节所述的方法设定颗粒的热泳力系数

19.7.3 考虑颗粒的耦合传热/传质

缺省情况下，颗粒的传热\传质方程使用分离求解算法求解。若用户激活了 Coupled Heat-Mass Solution 选项，FLUENT 将用一个具有误差精度控制的刚性耦合的 ODE（常微分方程）求解器来求解这些方程组。这样就提高了计算精度，但代价是增加了计算量。

19.7.4 考虑颗粒的布朗运动

对于层流中的亚观粒子，用户可能希望考虑布朗运动（细节请参阅 19.2.1）对颗粒轨道的影响。若希望如此，在离散相模型面板（Discrete Phase Model panel.）里激活布朗运动选项（Brownian Motion）即可[3]。当考虑布朗运动时，用户最好在 Drag Parameters 属性框里的下拉框 Drag Law 中选择 Stokes-Cunningham 曳力定律选项。

19.7.5 考虑颗粒的 Saffman 升力

对于亚观粒子，用户也可以模拟由于剪切力所带来的升力（Saffman 升力，细节请参阅 19.2.1）对颗粒轨道的影响。若希望如此，请在 Discrete Phase Model panel 面板中激活 Saffman Lift Force 选项。

19.7.6 监视颗粒在壁面的磨蚀／沉积

可以监视颗粒所引起的壁面磨蚀／沉积速率。选择了两相间的耦合后（即激活了 Interaction with Continuous Phase 选项），就可以在 Discrete Phase Model panel 激活该选项以计算磨蚀／沉积速率。一旦激活 Erosion/Accretion 选项后，当颗粒轨道在更新过程中，就可以计算颗粒在壁面的磨蚀／沉积速率。对每个壁面区域，用户需要在壁面边界条件面板中（细节请参阅 19.10.2）设定侵入角（Impact Angle Function，方程 19.2-62 中的 $f(a)$）、直径函数（方程 19.2-62 总的 $C(d_p)$）、速度指数函数（方程 19.2-62 中 $b(v)$ 的）。

19.7.7 颗粒曳力的选项

在 Drag Parameters 属性框中的 Drag Law 下拉框中可以选择五种颗粒曳力定律。其中，spherical，non-spherical，Stokes-Cunningham，以及 high-Mach-number 曳力定律（细节请参阅 19.2.1）总是可选的，但 dynamic-drag 定律（细节请参阅 19.4.4）只有在用户计算非稳态颗粒跟踪时选择了某种液滴破碎模型之后才是可选的。请参阅 19.8.2 以获得详细的液滴破碎模型说明。

若选择了 spherical 、high-Mach-number 或 dynamic-drag 定律，那么，就不需要用户再提供其他的输入项。若选择了 nonspherical 定律，用户还得设定颗粒形状系数（Shape Factor，方程 19.2-7 中的 f ）。若选择了 Cunningham 定律，用户需要设定卡宁修正系数（Cunningham Correction factor 方程 19.2-9 中的 C_c ）。

19.7.8 用户定义函数

用户可以使用用户定义函数来定制离散相模型，在这些函数中可以考虑附加的体力项、修订的相间交换项（作为源项）、沿着颗粒轨道计算或积分某一标量值、计算非标准磨蚀速率。关于用户定义函数请参阅单独的 UDF Manual 文档。

Discrete Phase Model panel 面板中，在用户定义函数属性框（User-Defined Functions）中，列出了 Body Force，Source，和 Scalar Update 三个下拉框。若在 Options 属性框中激活了 Erosion/Accretion 选项，那么，User-Defined Functions 下将会出现一个 Erosion/Accretion.

[3] 必须要激活能量方程选项

下拉框。这些下拉框表示在 FLUENT 中有那些用户定义函数是可选的，以让用户来自己定制离散相模型。（即在离散性模型方程中只有在下拉框中出现的那些项才是可修改的）

19.8 非稳态颗粒跟踪

这一节介绍离散相模型中非稳态颗粒跟踪问题。需要注意的是，在非稳态离散相计算中，用户不能使用可调整时间步长算法。

19.8.1 非稳态颗粒跟踪的输入

对于瞬态流动模拟，颗粒轨道的计算可以先于流体流动计算。若用户在 Discrete Phase Model panel 面板中的 Unsteady Parameters 属性框中激活了 Unsteady Tracking 选项，particles will be advanced by the flow time step each time the flow solution is advanced in time。在瞬态流动中也可以考虑相间耦合计算。在每一个迭代时间步长内，依据在 Number Of Continuous Phase Iterations Per DPM Iteration 设定的迭代步数进行颗粒轨道的迭代计算。

!! 当选择了显式耦合求解器时，在时间推进上将使用显式格式进行耦合计算，此时，在每个时间步，颗粒计算先于流体计算，并且是在每个时间步的开始进行计算。

对于每个喷入口，需要在 Set Injection Properties panel 面板里设定额外的输入。用户必须在 Point Properties 属性框中设定喷入的 Start Time 与 Start Time。若把起始与结束时间均设为零，就意味着颗粒仅在计算的开始时刻（t＝0）喷入流场。在瞬态计算过程中，改变喷入口的设定，并不会影响到已被释放到流场中的颗粒的状态。在瞬态计算的任一时刻，用户可以通过"清零"(在 Discrete Phase Model panel 点击 Clear Particles 按钮）把当前存在于流场中的所有颗粒全部去除。

在非稳态计算中，若用户希望存储颗粒的历史，可以用 File/Write/Start Particle History... 菜单项来设定存储颗粒历史数据的文件名。

File → Write → Start Particle History...

这样，在计算过程中，FLUENT 将记录每个颗粒在时间步的位置、速度以及其他信息数据。要关闭颗粒历史存储选项，依次选择 File/Write/Stop Particle History 菜单项。

File → Write → Stop Particle History

19.8.2 射流雾化选项

当用户激活了非稳态颗粒跟踪选项后，Discrete Phase Model 将会扩展，出现与射流雾化相关的选项。

模拟射流雾滴破碎

为了激活雾滴破碎模型，需要在 Spray Models 下激活 Droplet Breakup 选项，然后选择一种期望的模型（TAB 或波动模型）。关于两种模型的细节请参阅 19.4.3。

对于 TAB 模型，用户需要在 $y0$ 文本框中设定 $y0$ （方程 19.4-51 中的初始时刻的液滴变形值）的值。

对于波动模型，用户需要在 C_0, C_1 文本框中设定 C_0, C_1 的值（方程 19.4-72 中速度势函数与流函数的积分常数）。一般说来，用户不必修改 $B0$ （方程 19.4-80 中的模型常数）的数值，其缺省值 0.61 几乎适用于各种情况。

需要注意的是，在使用某种射流雾化模型之后，用户可以使用动态曳力模型。请参阅 19.7.7 以了解如何选择曳力定律的信息。

模拟液滴合并

为了考虑液滴合并（细节请参阅 19.4.2）的影响，请在 Spray Models 下激活 Droplet Collision 选项。此种情况下，不需要其他的用户输入。

19.9 离散相的初始条件设定

- 19.9.1 **初始条件设定概述** Overview of Initial Conditions
- 19.9.2 **射流源类型** Injection Types
- 19.9.3 **颗粒类型** Particle Types
- 19.9.4 **创建、复制、删除、列出射流源** Creating, Copying, Deleting, and Listing Injections
- 19.9.5 **定义射流源属性** Defining Injection Properties
- 19.9.6 **单射流源的点属性设定** Point Properties for Single Injections
- 19.9.7 **组射流源的点属性设定** Point Properties for Group Injections
- 19.9.8 **圆锥射流源的点属性设定** Point Properties for Cone Injections
- 19.9.9 **面射流源的点属性设定** Point Properties for Surface Injections
- 19.9.10 **平口雾化喷嘴的点属性设定** Point Properties for Plain-Orifice Atomizer Injections
- 19.9.11 **压力－旋流雾化喷嘴的点属性设定** Point Properties for Pressure-Swirl Atomizer Injections
- 19.9.12 **空气辅助雾化喷嘴的点属性设定** Point Properties for Air-Blast/Air-Assist Atomizer Injections
- 19.9.13 **平板扇叶雾化喷嘴的点属性设定** Point Properties for Flat-Fan Atomizer Injections
- 19.9.14 **气泡雾化喷嘴的点属性设定** Point Properties for Effervescent Atomizer Injections
- 19.9.15 **模拟颗粒湍流扩散** Modeling Turbulent Dispersion of Particles
- 19.9.16 **定制颗粒定律** Custom Particle Laws
- 19.9.17 **对多于一个射流源的共同属性的设定** Defining Properties Common to More Than One Injection

19.9.1 初始条件设定概述 Overview of Initial Conditions

在 FLUENT 中的离散相计算中，用户的主要输入项是初始条件项。初始条件定义了离散相每组颗粒流的起始位置、速度、及其他各种参数。这些初始条件构成了决定每个颗粒的瞬时状态值的颗粒因变量的初值。

- **颗粒位置（**x, y, z **坐标）**
- **颗粒速度（**u, v, w**）。在三维情况下，可以用速度模和喷射锥角来定义初始速度（细节请参阅** 19.9.8**）。对运动坐标系，应该设定相对速度**
- **颗粒直径** d_p
- **颗粒温度** T_p
- **沿着每个颗粒。／液滴轨道的颗粒流的质量流率** $\dot{m}_p$ **（只有考虑相间耦合时才是必须要设定的）**
- **其他的用于射流源处的各种参数（如果选择了某种雾化模型，请参阅** 19.4.1**）**

!! 当选择了某种雾化模型之后，由于液膜及线状液膜破碎的复杂性，用户不必设定液滴的初始直径、速度以及位置。此时，用户设定不是初始条件，而是雾化模型中全局参数。

当颗粒沿着其轨道运动时，这些变量通过运动方程（19.2 **节）、传热／传质方程（**19.3 **节）而得到更新。只要计算机有足够的内存，用户可以对离散相的颗粒／液滴设定任意多的不同初始条件。（即颗粒数目设定没有程序上的限制）**

19.9.2 射流源类型

只要创建一个射流源（injection**），并且对其设定了各种属性，用户就可以对颗粒／液滴定义初始条件。**FLUENT **提供了** 10 **种类型的射流源：**

- **单点射流源** single

- 组射流源 group
- 锥形射流源（仅适用于三维情况） cone (only in 3D)
- 面射流源 surface
- 平口雾化喷嘴 plain-orifice atomizer
- 压力－旋流雾化喷嘴 pressure-swirl atomizer
- 平板扇叶 flat-fan atomizer
- 空气辅助雾化 air-blast atomizer
- 气泡雾化喷嘴 effervescent atomizer
- 从文件中读取射流源数据 read from a file

对每种非雾化喷嘴类型的射流源，用户必须设定 19.9.1 节所介绍的每种初始条件、具有这些初始条件的颗粒类型以及任何与所选颗粒类型相关的参数。

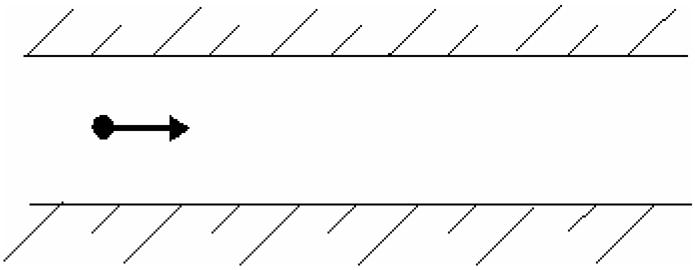
若仅希望对每种初始条件设定单值，用户应该创建单点射流源（如图 19.9.1 所示）；若希望对初始条件设定为一个范围（即一个尺寸范围或初始位置范围），应该创建一个组射流源（如图 19.9.2 所示）；若定义一个三维情况下的中空锥形射流源，应创建一个锥形射流源（如图 19.9.3 所示）；若想在一个面（既可以是区域面（zone surface）也可以是在 **Surface** 菜单中定义的表面）上抛撒颗粒，应该创建一个面射流源（若用户创建了面射流源，颗粒流将在所设定面上的每个子面被抛撒出去）。在三维情况下，用户可以使 **Plane Surface** 面板中的 **Bounded** 和 **Sample Points** 选项来创建一个关于颗粒的矩形网格射流源（这个网格仅对颗粒而言，不是流体计算用的网格，细节请参阅 24.6 节）。

若上述的射流源类型不能表示出用户所需要设定的射流源，那么，也可以从外部文件中读取数据获得颗粒的初始条件（颗粒位置、速度、直径以及质量流率）。这个文件应具有下列形式：

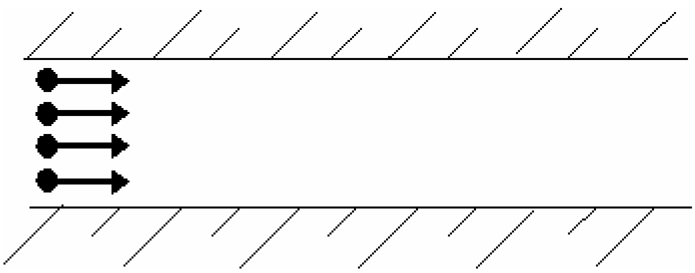
((x y z u v w 直径 温度 质量流率）名称）

所有参数应使用国际单位制（SI）。第二个括号（里层括号）内的参数是必需的，但名称是可选的。

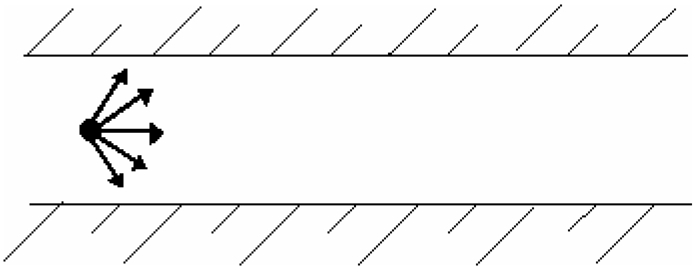
设定射流源所需的输入项的细节请参阅 19.9.5 节。



图表 10 单点颗粒流射流源



图表 11 具有初始空间分布的颗粒射流源



图表 12 定义了射流初始速度分布的射流源

19.9.3 颗粒类型

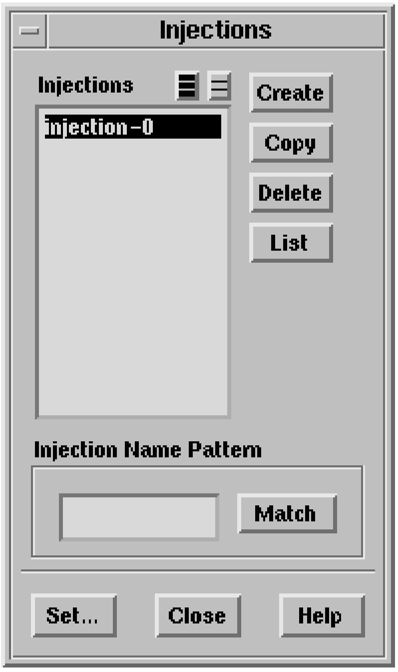
当设定一系列初始条件时（如 19.9.5 节所述），用户还应该定义颗粒类型。可以使用的颗粒类型依赖于用户在 Models 之类面板中已经设定好的物理模型类型。

- 惯性颗粒（``inert"）是服从力平衡（方程 19.2-1）以及受到加热／冷却影响（由定律 1 确定，请参阅 19.3.2）的一种离散相类型（颗粒、液滴或气泡）。在 FLUENT 任何模型中，惯性颗粒总是可选的。
- 液滴（``droplet"）是一种存在于连续相气流中的液体颗粒。它服从力的平衡并受到加热／冷却的影响（由定律 1 确定）。此外，他还由定律 2 和 3 确定自身的蒸发与沸腾（请参阅 19.3.3、19.3.4）。只有传热选项被激活并且至少两种化学组份在计算中是被激活的，或者已经选择了非预混燃烧或部分预混燃烧模型，液滴类型才是可选的。当选择了液滴类型之后，用户应该使用理想气体定律来定义气相密度（在 **Materials** panel,面板里，可参阅 19.25 节）。
- 燃烧（``combusting"）颗粒是一种固体颗粒，它遵从由方程 19.2-1 所确定的受力平衡、由定律 1 所确定的加热冷却过程、由定律 4 所确定的挥发份析出过程（19.3.5 节）以及由定律 5 所确定的异相表面反应机制（19.3.6 节）。最后，当颗粒的挥发份完全析出之后，非挥发份的运动、变化由定律 6 所确定。在 **Set Injection Properties** panel 面板中选定 **Wet Combustion** 选项，用户可以在燃烧颗粒中包含有可蒸发物质。这样，颗粒的可蒸发物质可在挥发份开始析出之前，经历由定律 2、3 所确定的蒸发与沸腾过程（19.3.3、19.3.4 节）。只有在模型中包含有热量的转移过程并且至少声明三种以上的化学组分或者使用了非预混燃烧模型，燃烧类型颗粒才是可选的。选定燃烧类型颗粒之后，用户不需使用理想气体定律来定义气相密度（在 **Materials** panel 面板里）

19.9.4 创建、复制、删除、列出射流源（Creating, Copying, Deleting, and Listing Injections）

用户可以使用 **Injections** panel 面板（图 19.9.4）来建、复制、删除、列出射流源。

Define → **Injections...**



图表 13 射流源面板

（也可以在 Discrete Phase Model panel 面板中点击 Injections...按钮来打开射流源面板。）

创建射流源：

点击 Create 按钮来创建一个射流源。然后，在射流源列表框中将会出现一个新的射流源，并且 Set Injection Properties panel 面板自动打开以便用户设定射流源的各种属性（请参阅 19.9.5 节）。

修改射流源：

在射流源列表框中选定想要进行修改的射流源，然后点击 Set...按钮，就可以进行修改了。Set Injection Properties 面板会自动打开，用户就可以任意修改此射流源了。

若用户希望对两个以上的射流源设定某些相同的属性，那么，选中这些射流源，然后点击 Set...按钮。Set Multiple Injection Properties 面板将会自动打开，已进行相同属性的设定。关于如何使用此面板清参阅 19.9.17。

复制射流源：

选定某个业已存在的射流源，然后点击按钮，就可以进行射流源的复制。面板将会自动打开，出现一个新的射流源，它的属性与被复制的射流源的属性完全相同。在设定一个与原有射流源具有相同属性的新射流源时，这项功能作用较大。

删除射流源：

在射流源列表框中选定要被删除的射流源，点击 Delete 按钮就可以了。

射流源信息显示：

选定某些射流源，点击 List 按钮可以显示这些射流源的初始状态。信息显示在 FLUENT 控制台里，对于每个已经定义的射流源，其信息的内容（均为国际单位制）如下：

- 在 NO 行下为颗粒流的标识号
- 在 TYP 行下为颗粒流类型（IN 为惯性颗粒、DR 为液滴、CP 为燃烧颗粒）
- 在(X)，(Y)，(Z)行下为颗粒的三向坐标
- 在(U)，(V)，(W)行下维颗粒的三向速度
- 在(T)行下为颗粒温度
- 在(DIAM)行下为颗粒直径

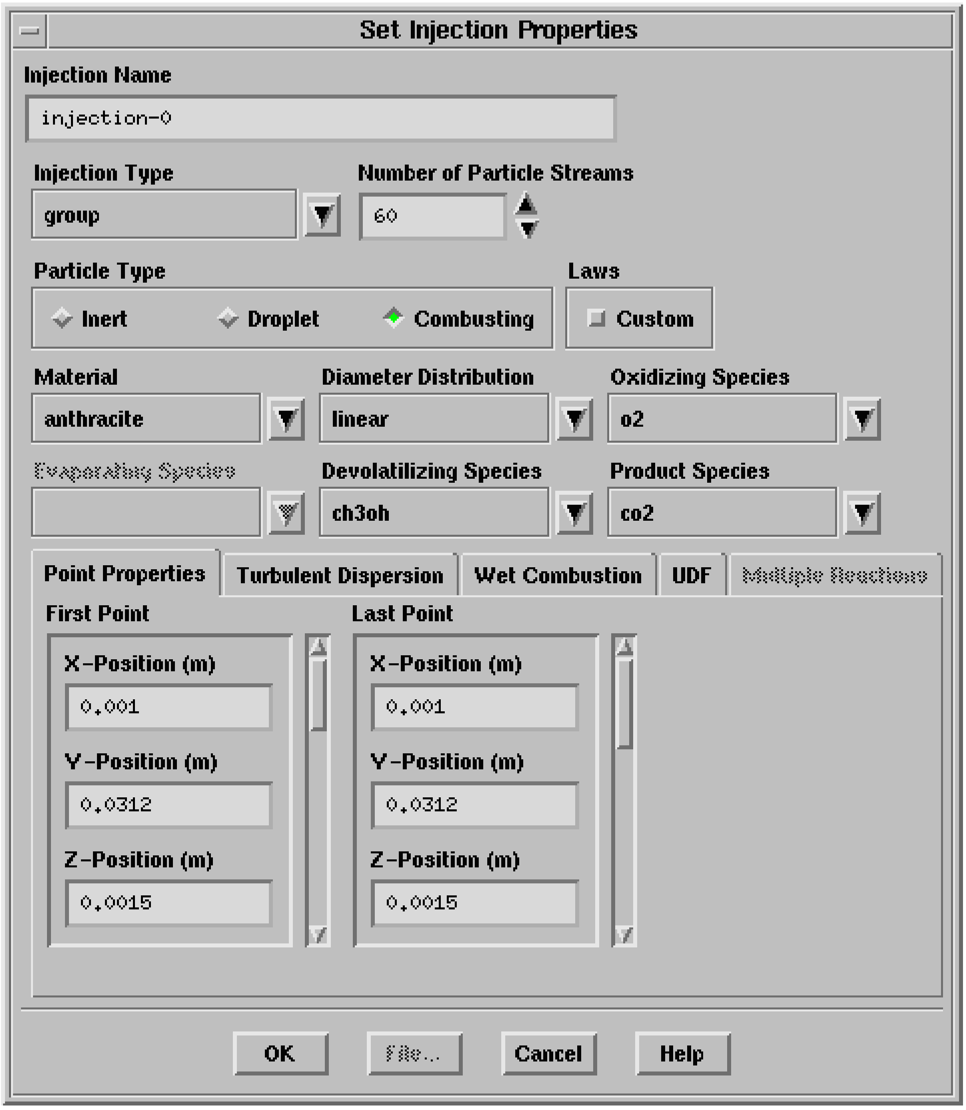
- 在(MFLOW)行下为颗粒的质量流率

选定射流源的快捷方式：

FLUENT 提供一种以射流源名称进行匹配选定的快捷方式。在 Injection Name Pattern 属性框中输入需要进行匹配的射流源名称，然后点击 Match 以进行匹配选择。例如。若输入 drop*，所有以 drop 开头命名的射流源（例如 drop-1，droplet）将会被自动选定。若在此之前，某些射流源已被选定，此时将会被弃选。若用户输入 drop?，所有包含有 drop，并且紧跟但个字符的射流源将会被选定（若在此之前已被选定，此时就被弃选）。

19.9.5 定义射流源属性

在创建射流源(使用面板，请参阅 19.9.4 节)之后，用户可以使用 Set Injection Properties panel 面板（图 19.9.5）来设定射流源的属性。（当用户创建新的射流源、或者是在选定某个射流源之后点击 Set...按钮，这个面板就会自动弹出）



图表 14 射流源属性设定面板

设定某个射流源的过程如下：

1. 若不想使用射流源的缺省名称，在 Injection Name 区中输入新的名称即可。在定义很多射流源的时候，推荐使用这种方法，这样就可以方便的区分他们。当为射流源设定名

称时，请记住 19.9.4 节所介绍的快捷方式。

2. 在下拉列表框中选定射流源类型。19.9.2 节介绍了这十种射流源选项（(single, group, cone, surface, plain-orifice-atomizer, pressure-swirl-atomizer, air-blast-atomizer, flat-fan-atomizer, effervescent-atomizer, and file）。需要注意的是，当用户选定了某种射流雾化模型之后，必须在 Materials 面板中设定粘度和液滴表面张力。

!! 当用户使用滑移或变形网格时，由于表面射流源与之不兼容，所以不能使用（surface injections）。

3. 若定义 single 射流源，请跳过此步。对于 group, cone 或任一种喷嘴类型（atomizer）射流源，请在相应的类型内设定颗粒流数目（Number of Particle Streams）。若定义表面射流源，请在 Release From Surfaces 列表框中选择释放颗粒的表面。若从文件中读取射流源的信息，请在 Set Injection Properties panel 面板底部点击 File...按钮，然后在弹出的文件选择对话框中选定文件。文件中的参数必须使用国际单位制。
4. 在 Particle Type 颗粒类型选项中选定 Inert, Droplet, or Combusting，19.9.3 介绍了可选的颗粒类型。
5. 在 Material 下拉列表中选定颗粒的介质。若用户是第一次创建此种类型颗粒，那么，颗粒介质可在数据库中预设的各种介质中任意设定；若已经创建有颗粒，那么，只有创建好的颗粒的介质是可选的。用户可以通过从数据库中直接复制或自己创建其他类型的颗粒介质（请参阅 19.11.2 以及 7.1.2）
6. 若定义了 group or surface 射流源，并且不想使用缺省的颗粒直径的线性（适用于 group 类型）或均匀（适用于 group 类型）插值方式，那么，可以在 Diameter Distribution 下拉列表中选定 rosin-rammler 或 rosin-rammler-logarithmic 分布。19.9.7 节介绍了对于 group 类型射流源颗粒直径分布的方法。
7. 若用户使用用户定义函数定制了自己的颗粒定律，那么，可以在 Laws 属性框下激活 Custom 选项，并且选定相关的定律（请参阅 19.9.16）
8. 若颗粒类型为 Inert，请跳过此步。若定义 Droplet 颗粒，请在 Evaporating Species（蒸发组分）下拉列表框下选定由蒸发与沸腾定律（定律 2、3）确定的气相组分。

   若定义的是 Combusting 燃烧类型颗粒，可在 Devolatilizing Species 下拉列表框下选定由挥发份析出定律 4 确定的气相组分，参与焦炭表面燃烧反应（定律 5）的气相组分列于 Oxidizing Species（氧化剂组分）列表中，有表面反应生成的气相组分则列于 Product Species（生成物组分）列表中。需要注意的是，对于选定的燃烧颗粒介质，如果燃烧模型为 multiple-surface-reaction 多表面异相反应模型，那么，由于化学反应计量比在混合介质中已经被确定，所以 Oxidizing Species 与 Product Species 列表将变灰（不可选）。
9. 点击 Point Properties 菜单条（缺省选项），然后设定射流源属性（位置、速度、颗粒直径、温度、若需要的话，还可设定颗粒质量流量以及其它的与喷嘴相关的参数），关于如何设置请参阅 19.9.6～19.9.14。
10. 若流动为湍流并且希望考虑湍流对颗粒的影响，可点击 Turbulent Dispersion 菜单项，激活 Stochastic Model 或 Cloud Model 选项，并设定相应的参数（请参阅 19.9.15）。
11. 若燃烧颗粒包含有可蒸发成分，点击 Wet Combustion 菜单项，选定 Wet Combustion 选项，然后在 Liquid Material 下拉列表框中选定颗粒挥发分析出之前从颗粒蒸发（沸腾）出来的介质组分。也可以通过在 Liquid Fraction 下输入数值来设定液体组分的体积分数。最后，在面板顶部的 Evaporating Species 下拉列表中选定由蒸发、沸腾定律确定的气相组分。
12. 若希望使用用户定义函数来初始化射流源属性，可点击 UDF 菜单项。在 User-Defined

Functions 下选定一个初始化函数来修改颗粒喷射进入流动区域时的射流源属性。这样，射流源的位置或属性可被设定为流动状况的函数。关于用户定义函数请参阅单独的 UDF Manual 手册。

19.9.6 单射流源的点属性设定

对于单射流源，在 Point Properties 下（在 Set Injection Properties panel 面板中）可以对颗粒流设定如下的初始条件：

- 位置：在 X-, Y-, and Z-Position 文本框区可以设定射流的沿直角坐标的三向位置（在三维情况下才会有 Z-Position 出现）
- 速度：在 X-, Y-, and Z- Velocity 文本框区可以设定射流初始速度沿直角坐标的三向分量（在三维情况下才会有 Z- Velocity 出现）
- 直径：在 Diameter 区可设定喷射颗粒流的初始颗粒直径。
- 温度：在 Temperature 区可设定喷射颗粒流的初始颗粒（绝对）温度。
- 质量流率：对于相间耦合计算，可在 Flow Rate 区设定单位时间内进入流动区域的颗粒质量。需要注意的是，对于轴对称问题，质量流量为 $2p$ 弧度内的流量；二维情况下，为单位深度方向的质量流量（不依赖于长度的参考值）。
- 射流持续时间：对于非稳态颗粒跟踪计算（请参阅 19.8 节），在 Start Time 和 Stop Time 区设定喷射的开始于结束时间。

19.9.7 组射流源的点属性设定

对于组射流源，用户可按照 19.9.6 节定义单射流源的方法定义组射流源的第一点 First Point 与最后一点 Last Point 的射流属性。这就是说，用户可以定义一个取值范围（由 f_1 到 f_N），对每一个初始条件 f 设定相应的 f_1 与 f_N 值。FLUENT 使用线性插值方法对第 i 个射流源在第一个与最后一个 f 值之间进行插值。

$$f_i = f_1 + \frac{f_N - f_1}{N-1}(i-1) \qquad (19.9.1)$$

这样，例如，用户设定的组射流源包含有 5 个颗粒流，并且对颗粒的初始 x 位置定义的范围为 0.2~0.6m，那么，对于每个射流源，初始 x 位置分别为：

- 颗粒流 1：$x = 0.2$ m
- 颗粒流 2：$x = 0.3$ m
- 颗粒流 3：$x = 0.4$ m
- 颗粒流 4：$x = 0.5$ m
- 颗粒流 5：$x = 0.6$ m

!!一般说来，you should supply a range for only one of the initial conditions in a given group--leaving all other conditions fixed while a single condition varies among the stream numbers of the group. Otherwise you may find, for example, that your simultaneous inputs of a spatial distribution and a size distribution have placed the small droplets at the beginning of the spatial range and the large droplets at the end of the spatial range.

需要注意的是，用户可用如下所述的不同方法来定义颗粒尺寸分布。

使用颗粒直径 Rosin-Rammler 分布方法

缺省情况下，用户可通过输入第一点与最后一点颗粒直径，然后进行线性插值的方法（19.9-1）来改变组射流源的每个颗粒流的直径。但是，若用户希望对具有相同直径的每种颗粒/液滴设定不同的质量流率时，线性插值方法并不能满足设定需要。通过对颗粒尺寸进

行 Rosin-Rammler 分布拟合，就可以很容易的定义这种分布。在这个方法里，所有的颗粒尺寸范围被划分为离散的尺寸组，每个尺寸组由组射流源中的单个颗粒流所代表。例如，假定颗粒直径数据服从如下的分布：

直径 尺寸范围（mm）	质量分数 所占比例
0-70	0.05
70-100	0.10
100-120	0.35
120-150	0.30
150-180	0.15
180-200	0.05

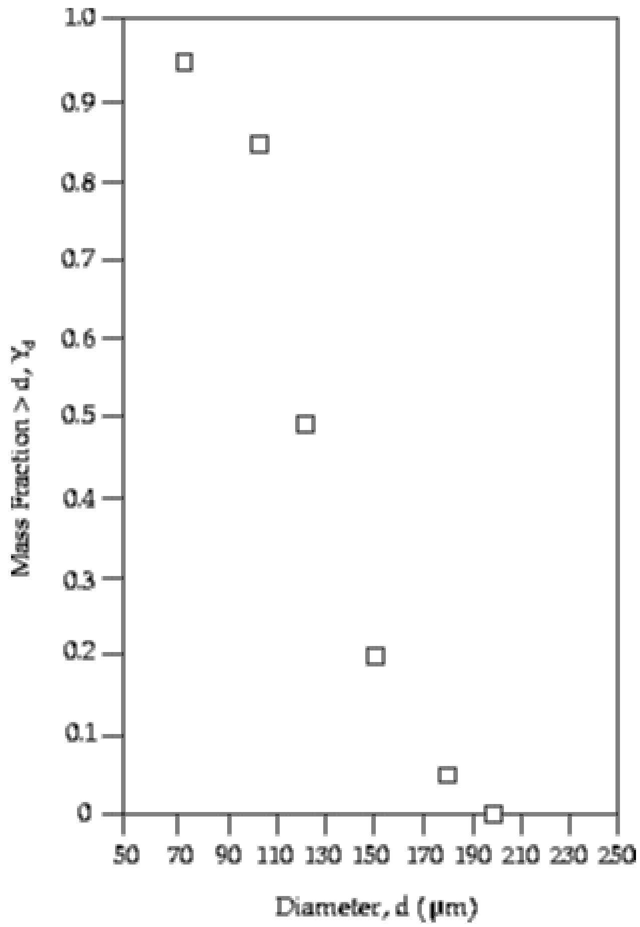
Rosin-Rammler 分布假定在颗粒直径 d 与大于此直径的颗粒的质量分数 Y_d 之间存在指数关系：

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \qquad (19.9.2)$$

方程 19.9-2 中的$\bar{d}$ 为 Mean Diameter 平均直径（中位径），n 为分布指数 Spread Parameter。这两个参数由用户输入（在 Set Injection Properties panel 面板中的 First Point 下）以确定 Rosin-Rammler 尺寸分布。为确定这些参数，必须把颗粒数据拟合成 Rosin-Rammler 指数方程形式。首先需要把颗粒尺寸数据按照 Rosin-Rammler 分布的格式排列。对于上述的例子，重排后的关于d 与Y_d 数据形式为：

	质量分数
直径，$d(mm)$	直径大于d 的颗粒质量分数Y_d
70	0.95
100	0.85
120	0.50
150	0.20
180	0.05
200	（0.00）

图 19.9.6 为Y_d 随d 的变化图。

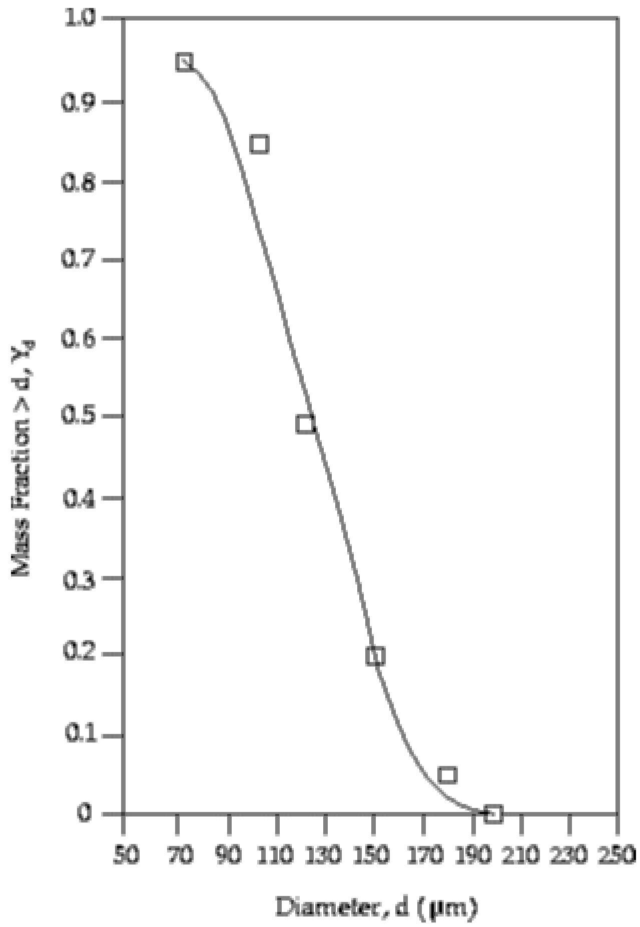


图表 15 颗粒质量累积率尺寸分布

然后，用图 19.9.6 中的数据求出如方程 19.9-2 中的$\bar{d}$与n。$\bar{d}$为$Y_d = e^{-1} \approx 0.368$时的颗粒直径。从、图 19.9.6，$\bar{d}$的估计值大概为 131。$n$值由下式给出：

$$n = \frac{\ln\left(-\ln Y_d\right)}{\ln\left(d/\bar{d}\right)}$$

把Y_d与$d/\bar{d}$的数值代入上式可得到n值及其平均值。对于上述的例子，均值为$n = 4.52$。图 19.9.7 列出了进行 Rosin-Rammler 拟合后的曲线与原始数据的对比值。使用 **Set Injection Properties** panel 面板，用户可以象输入颗粒直径一样输入Y_d与n的数值，并且给出颗粒流整体的质量流率。



图表 16 例子中的 Rosin-Rammler 拟合曲线

基于颗粒直径对数值的第二类 Rosin-Rammler **分布也是可选的。若颗粒尺寸分布中，小直径的颗粒比大直径颗粒具有更高的质量流率，那么，用户最好是把小直径的颗粒设定成单独的"小组"。这个时候，在** Rosin-Rammler **分布中的自变量可取成** $\ln d$ **。**

在标准 Rosin-Rammler **分布中，颗粒的直径范围可能是** 1～2001~200mm **。使用对数**

Rosin-Rammler **分布，同样的颗粒尺寸范围可以转化为**0~5.3**，这样，某个尺寸范围内颗粒的质量流率就不会与其它尺寸组相差悬殊。**

当对组射流源的尺寸分布进行定义时，除了定义颗粒初始速度、位置、温度以外，用户还需要定义下述的各个参数，这些参数均出现在 First Point 选项下。

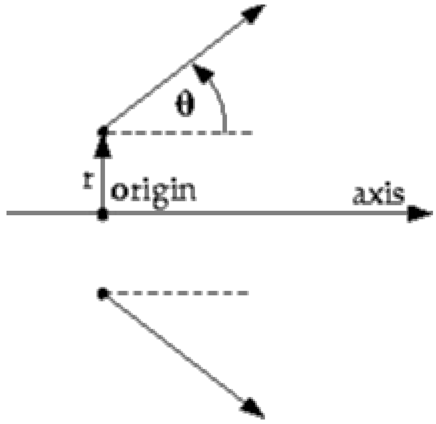
- **Total Flow Rate**:**（总质量流率）既主射流源中第** N **个颗粒流的总质量流率。需要注意的是，对于轴对称情况，质量流率为** 2p **弧度内的流率，二维情况下，为单位深度上的流率。**
- **Min. Diameter**:**（最小颗粒直径）：颗粒直径尺寸分布的最小直径**
- **Max. Diameter**:**（最大颗粒直径）：颗粒直径尺寸分布的最大直径**
- **Mean Diameter**:**（平均直径）：**Rosin-Rammler **分布方程（**19.9-2**）中的尺寸分布参数**$\bar{d}$ **。**
- **Spread Parameter**:**（分布指数）方程** 19.9-2 **中的指数参数**n**。**

19.9.8 圆锥射流源的点属性设定 Point Properties for Cone Injections

对于三维问题，用户可以使用 cone 类型射流源来方便的定义中空的颗粒射流。对于这种类

型的射流源，其所需的输入参数如下：

- 位置：设定喷射源的三向坐标，在 X-, Y-, 和 Z-Position 区输入。
- 直径：设定颗粒流的直径，在 Diameter 区输入。
- 温度：设定颗粒流的温度，在 Temperature 区输入。
- 轴向分量：设定锥形射流源轴线向量的三个分量，在 X-Axis, Y-Axis, 和 Z-Axis 区输入。
- 速度：设定沿着某个喷射角的锥形射流源的颗粒流的速度，在 Velocity Mag 区设定。
- 锥形角：设定中空锥形射流源的喷射半角q，在 Cone Angle 区设定，如图 19.9.8 所示。
- 喷射半径：非零的内径值r，在 Radius 区设定（如图 19.9.8 所示），颗粒将在以设定的轴线为中心的，半径为r的区域内喷射进入流动区域。



图表 17 锥形射流源的锥形角与喷射半径

- 旋流分数：设定射流源的旋转射流速度分量，在 Swirl Fraction 区设定。旋转分量按右手法则确定（若为负值，则表示相反的旋向相反）。
- 质量流率：对于相间耦合计算，设定射流源的总质量流量，在 Total Flow Rate 区设定。

需要注意的是，为了包含射流颗粒尺寸分布以及不同的喷射锥角，可以在相同的初始位置设定多组锥形射流源。

19.9.9 面射流源的点属性设定

对于面射流源的设定，除了颗粒流的初始位置以外，用户可以遵照 19.9.6 节介绍的点射流源设定步骤。面射流源的颗粒流初始位置处在已经设定好的某个面上。需要注意的是，用户设定的总质量流率（Total Flow Rate）为从所定义的面上喷射的总流率（仅对相间耦合计算是必须设定的）。若需要，用户可通过定义好的喷射颗粒的面积之间的比例来缩放每一个面射流源的质量流率。为此，可在 Point Properties 下选定 Flow Rate By Face Area 选项即可。

需要注意的是，很多面上的网格点分布并不均匀。对于三维情况，若希望生成在空间上均匀喷射颗粒的面，用户可以在 Plane Surface panel 面板中创建一个边界包裹面（bounded plane surface，请参阅 24.6）。对于二维情况，可以在面板中创建一个耙线（rake，请参阅 24.5）。

对于面射流源可以使用如下的非均匀尺寸分布的颗粒。

使用 Rosin-Rammler 分布方法

19.9.7 节所介绍的适用于组射流源的 Rosin-Rammler 分布也可用于面射流源。若用户选定了某种 Rosin-Rammler 分布，除了设定颗粒的初始速度、温度以及质量流量外，在 Point Properties,下，还得设定如下的各个参数：

- Min. Diameter:（最小颗粒直径）：颗粒直径尺寸分布的最小直径
- Max. Diameter:（最大颗粒直径）：颗粒直径尺寸分布的最大直径
- Mean Diameter:（平均直径）：Rosin-Rammler 分布方程（19.9-2）中的尺寸分布参数$\overline{d}$。

- **Spread Parameter**:（分布指数）方程 19.9-2 中的指数参数n。
- **Number of Diameters**:（直径组数目）每个直径尺寸组的总数目（即从每个面-几何面-的子面-网格面-喷射出去的具备不同直径的颗粒组数目）

在 FLUENT 中，颗粒流将从每个面的子面上喷射出去，而喷射颗粒的直径由 Rosin-Rammler 分布定义。总的喷射流中的颗粒流数目等于尺寸分布中规定的颗粒直径组数目乘以子面数目（即网格面总数）。

19.9.10 平口雾化喷嘴的点属性设定

对于平口雾化喷嘴，用户需要在 **Point Properties** 下设定如下的初始条件：

- 位置：在 **X-**, **Y-**, and **Z-Position** 文本框区可以设定射流的沿直角坐标的三向位置（在三维情况下才会有 **Z-Position** 出现）
- 速度：在 **X-**, **Y-**, and **Z- Velocity** 文本框区可以设定射流初始速度沿直角坐标的三向分量（在三维情况下才会有 **Z- Velocity** 出现）
- 轴的方向（仅适用于三维）：设定确定喷嘴轴线方向的三个分量，在 **X-Axis**, **Y-Axis**, and **Z-Axis** 区设定。
- 温度：在 **Temperature** 区可设定喷射颗粒流的初始颗粒（绝对）温度。
- 质量流率：可在 **Flow Rate** 区设定喷嘴的的颗粒质量流量。
- 射流持续时间：对于非稳态颗粒跟踪计算（请参阅 19.8 节），在 **Start Time** 和 **Stop Time** 区设定喷射的开始于结束时间。
- 蒸气压：设定控制通过喷嘴内部流动的蒸气压（表 19.4.1 中的p_v），在 **Vapor Pressure** 区设定。
- 直径：设定喷嘴直径（表 19.4.1 中的d），在 **Injector Inner Diam.**区设定。
- 喷嘴长度：设定喷嘴的长度（表 19.4.1 中的L），在 **Orifice Length** 区设定。
- 内台阶角半径（导角半径）:设定喷嘴内台阶处的导角半径（表 19.4.1 中的r），在 **Corner Radius of Curv.**区设定。
- 喷嘴参数：设定射流角修正系数（方程 19.4-16 中的C_A），在 **Constant A** 区设定。
- 方位角：设定三维情况下的喷嘴方位开始角与结束角，在 **Azimuthal Start Angle** and **Azimuthal Stop Angle** 区设定。

关于如何使用上述的输入项，请参阅 19.4.1。

19.9.11 压力－旋流雾化喷嘴的点属性设定

对于压力－旋流雾化喷嘴，用户的很多设定项与平口雾化喷嘴设定相同。除了象 19.9.10 节所介绍的那样设定位置、轴线方向（三维）、温度、质量流量、射流持续时间（非稳态）、射流内半径以及方位角（若需要）。还需要在 **Point Properties** 下设定如下的参数：

- 射流角：在 **Spray Half Angle** 区下设定射流喷射半角（方程 19.4-25 中的q）。
- 压力：在 **Upstream Pressure** 区下设定喷嘴上游压力（表 19.4.1 中的 p_1）。
- 液膜破碎常数：设定确定液膜破碎时形成的线状液膜长度的一个经验常数（方程 19.4-30 中的$\ln\left(\frac{h_b}{h_0}\right)$），在 **Sheet Constant** 区设定。
- 线状液膜直径：对于短波，确定液膜破碎波长与线状液膜半径之间的线形比例关系的比例常数（请参阅方程 19.4-31、19.4-33），在 **Ligament Constant** 区设定。

关于输入项的设定，请参阅 19.4.1 节。

19.9.12 空气辅助雾化喷嘴的点属性设定

对于空气辅助雾化喷嘴，用户需要的许多设定项与平口雾化喷嘴的设定相同。除了需要设定位置、轴线方向（三维）、温度、质量流量、射流持续时间（非稳态）、喷嘴内半径以及方位角（若需要的话）之外，还需要在 Point Properties:区下设定其他参数：

- 喷嘴外半径：在 Injector Outer Diam.区下设定射流的外部半径。此数值与喷嘴内部半径共同确定了液膜厚度（方程 19.4-22 中的t）。
- 射流角：设定射流离开喷口时的液膜初始轨道（方程 19.4-25 中的q），在 Spray Half Angle 区设定。
- 相对速度：设定液膜与空气之间的最大相对速度，在 Relative Velocity 区设定。
- 液膜破碎常数：设定确定液膜破碎时形成的线状液膜长度的一个经验常数（方程 19.4-30 中的$\ln\left(\frac{h_b}{h_0}\right)$），在 Sheet Constant 区设定。
- 线状液膜直径：对于短波，确定液膜破碎波长与线状液膜半径之间的线形比例关系的比例常数（请参阅方程 19.4-31、19.4-33），在 Ligament Constant 区设定。

关于输入项的设定，请参阅 19.4.1 节。

19.9.13 平板扇叶雾化喷嘴的点属性设定

平板扇形雾化模型仅适用于三维情况。用户需要在 Point Properties 下设定如下的初始条件：

- 扇叶中心点：设定射流源起始位置的三向坐标值（请参阅图 19.4.6），在 X-Center, Y-Center, and Z-Center 区设定。
- 虚点位置：设定喷嘴扇叶的各边的虚拟交叉点（请参阅图 19.4.6），在 X-Virtual Origin, Y-Virtual Origin, and Z-Virtual Origin 区设定。
- 垂直方向：设定垂直扇叶的向量的各个分量，在 X-Fan Normal Vector, Y-Fan Normal Vector, and Z-Fan Normal Vector 区设定。
- 温度：设定颗粒流的温度，在 Temperature 区设定。
- 质量流量：设定喷嘴的质量流量，在 Flow Rate 区设定。
- 射流持续时间：对于非稳态颗粒跟踪计算（请参阅 19.8 节），在 Start Time 和 Stop Time 区设定喷射的开始于结束时间。
- 射流角：在 Spray Half Angle 区下设定射流喷射半角。
- 喷口宽度：设定喷口垂直方向的宽度，在 Orifice Width 区设定。
- 液膜破碎常数：设定确定液膜破碎时形成的线状液膜长度的一个经验常数（请参阅方程 19.4-30），在 Flat Fan Sheet Constant 区设定。

关于输入项的设定，请参阅 19.4.1 节。

19.9.14 气泡雾化喷嘴的点属性设定

对于气泡雾化喷嘴，用户需要的许多设定项与平口雾化喷嘴的设定相同。除了如 19.9.10 介绍的需要设定位置、轴线方向（三维）、温度、质量流量（包括空穴与非空穴流量）、射流持续时间（非稳态）、蒸汽压、喷嘴内半径以及方位角（若需要的话）之外，还需要在 Point Properties:区下设定其他参数：

- 混合情况参数：设定射流中液－气混合物中已蒸发的液滴质量分数（方程 19.4-38 中的x），在 Mixture Quality 区设定。
- 饱和温度：设定可挥发成分的饱和温度，在 Saturation Temp.区设定。
- 液滴扩散系数：设定控制液滴在空间扩散性能的扩散系数（方程 19.4-38 中的C_{eff}），在 Dispersion Constant 区设定。

- 射流角：设定液膜离开喷口时的初始轨道方向角，在 **Maximum Half Angle** 区设定。

关于输入项的设定，请参阅 19.4.1 节。

19.9.15 模拟颗粒湍流扩散

如 19.9.5 节所介绍的，用户可以选择随机跟踪或颗粒云模型来模拟颗粒的湍流扩散。

随机跟踪

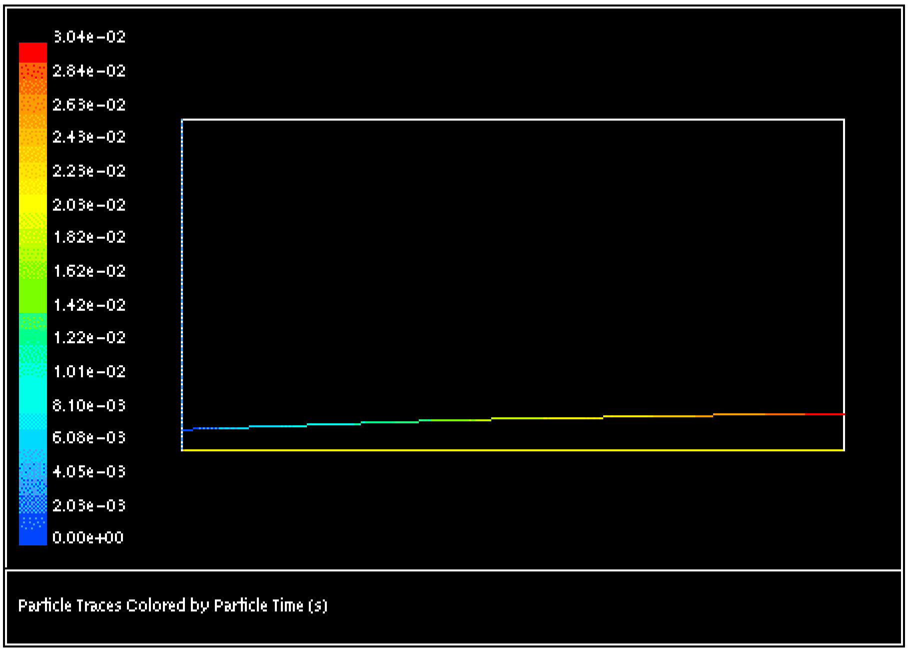
对于湍流，若用户希望使用随机跟踪方法，那么，必须激活此选项，并且设定跟踪次数（the ``number of tries".）。随机跟踪方法使用随机游走方法（请参阅 19.2.2）来考虑颗粒湍流脉动速度对颗粒的影响。

1. 在 **Set Injection Properties** 面板中点击 **Turbulent Dispersion** 菜单项。
2. 在 **Stochastic Tracking** 选项下选中 **Stochastic Model** 以激活随机跟踪方法。
3. 设定跟踪次数（**Number Of Tries**）：
   - 若输入零，那么，FLUENT 使用连续相的时均速度来计算颗粒轨道（方程 19.2-1），因此，计算中忽略了湍流对颗粒轨道的影响。
   - 若输入为大／等于 1 的数值，那么，FLUENT 在计算颗粒轨道时，将会在粒受力平衡方程 19.2-20 中考虑湍流对颗粒的影响。若输入数值大于 1，将多次计算颗粒轨道：输入 2，则计算两次轨道；输入 3。则计算三次轨道，等等。每次轨道计算，在颗粒平衡方程中都使用新的湍流脉动值。

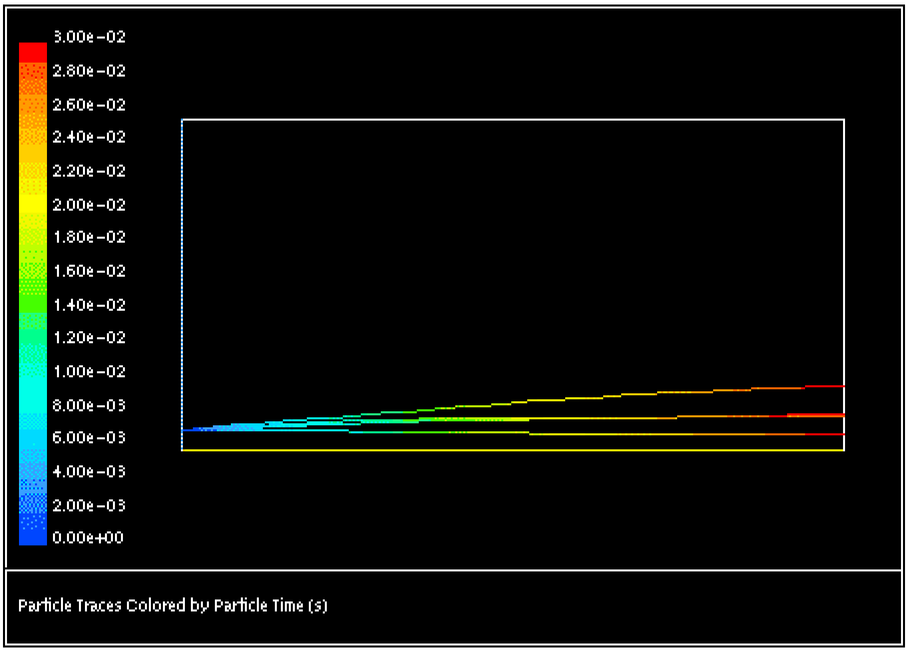
   若计算足够多次颗粒轨道，那么，轨道计算中就包含有受到湍流影响的颗粒流的统计特征量。需要注意的是，对于非稳态颗粒跟踪，若激活了随机跟踪方法，那么，轨道计算次数需设定为 1。

若希望对涡团特征生存时间取为随机值（方程 19.2-37），那么，可激活 **Random Eddy Lifetime** 选项。一般来说，不需要改变时间标尺常数（方程 19.2-28 中的 C_L ）的缺省值 0.15；若使用雷诺应力模型（RSM），推荐使用其缺省值 0.3。图 19.9.9 显示出使用“流体时均速度”的颗粒轨道计算方法（轨道计算次数＝0）得到的颗粒轨迹图；图 19.9.10 显示出使用“随机速度”颗粒轨道计算方法（轨道计算次数>0）得到的颗粒轨迹图。

当执行多次轨道计算时，对射流源定义的动量、质量通量等将平均分配到每一个颗粒轨道中，这样，相间动量、热量以及质量交换量都要发生相应的分配变化。于是，在考虑相间耦合计算时，若包含湍流对颗粒的影响的话，这种影响就会很强烈。



图表 18 湍流中的“流体时均速度”轨道计算结果



图表 19 湍流中的“随机速度”轨道计算结果

颗粒云模型

对于湍流，用户可以考虑湍流扩散对射流颗粒的影响。当使用颗粒云模型方法时，所跟踪的颗粒流轨道将是围绕着某个平均轨道的“云团”，细节请参阅 19.2.2。

1. **在 Set Injection Properties 面板中点击 Turbulent Dispersion 菜单项。**
2. **在 Cloud Tracking 下选定 Cloud Model 以激活颗粒云模型。**
3. **设定颗粒云团的最小与最大许可半径。颗粒将以设定的最小许可半径（Min. Cloud Diameter）进入流动区域。在 Max. Cloud Diameter 下可设定颗粒云的最大许可半径。用户可能会需要根据具体问题的长度尺度来限制最大许可半径以提高具有复杂几何形**

状结构的计算效果，因为这种情况下，在局部回流区域，颗粒流的平均轨道计算会陷入死循环。

19.9.16 定制颗粒定律

若 FLUENT 中的标准颗粒定律（定律 1～6）满足不了用户的需求，那么，可以通过用户定义函数来创建自己的颗粒定律（关于用户定义函数，请参阅单独的用户定义函数手册）。也可以使用 FLUENT 中业已存在的颗粒定律（例如使用定律 1、2 和 4）来创建颗粒定律；或者是使用混合方法（既有用户定义函数，又有已设定好的颗粒定律）。

一旦定义并装载了用户定义函数之后，在 Set Injection Properties panel 面板中的 Laws 选项下激活 Custom 选项，用户就可以创建定制的定律。此举将打开 Custom Laws panel 面板。在左边的六个颗粒定律下拉列表框下，用户可以为定制的颗粒定律选定相应的定律项。每个列表框下都包含有可选的颗粒定律项（标准颗粒定律与已经装载的用户定义函数）。



图表 20 颗粒定律定制面板

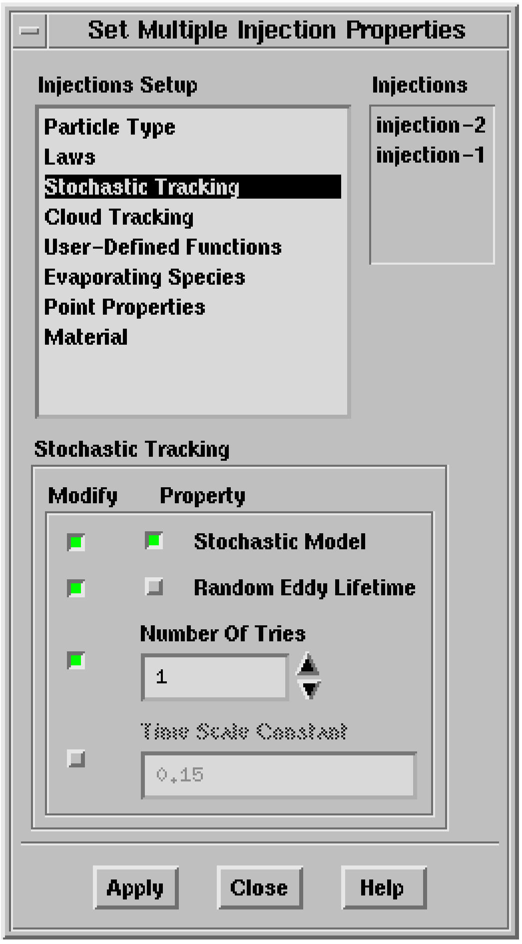
Custom Laws panel 面板中的第七项是标识为 Switching 的下拉列表框。用户可能希望依据模型中的不同条件来进行颗粒定律适用情况的转换。那么，从这个下拉列表框中选择某个用户定义函数就可以自己定义这种转换依存关系。

使用用户定制颗粒定律的一个例子：可以使用一个更精确描述某些特性的颗粒脱挥发分定律来替代原有的标准挥发分析出定律。在创建并装载了描述挥发分析出定律的用户定义函数之后，进入 Custom Laws panel 面板，然后使用用户定义函数替换掉标准挥发分析出定律（定律 2）。

19.9.17 对多于一个射流源的共同属性的设

若希望对多个射流源设定某些相同的属性，可以使用 FLUENT 提供的一个快捷方式。对于所要修改的每个射流源，不需要到 Set Injection Properties 面板中去逐个设定属性。

如 19.9.5 节所述，若用户在 Injections 面板中选定了超过 1 个射流源，那么，在点击 Set... 按钮之后，就回弹出 Set Multiple Injection Properties 面板（图 19.9.12）而不是 Set Injection Properties 面板。



图表 21 多射流源属性设定面板

根据用户已经选定的不同的射流源（单射流源、组射流源、喷嘴类型射流源等），在 Injections Setup. 下列出的属性目录将会不相同。目录列出的中各个选项的名称与 Set Injection Properties 面板中的属性框窗口名称（例如 Particle Type and Stochastic Tracking）相对应。只有那些对已经选定的射流源（在 Injections 列表中列出的）均是可选的选项才会出现在这个目录列表中。若所有已经选中的射流源类型相同，那么，就有更多的属性项可供用户进行修改。若这些射流源彼此不同，那么，可供修改的选项就很少。

属性修改：

修改属性的步骤如下：

1. 在 Injections Setup 列表中选定要修改的属性项。例如，若用户希望对所有的射流源设定相同的质量流量，那么，可选定 Point Properties。此面板将会扩展，显现出属性设定选项，其面板的属性框名称为 The panel will expand to show the properties that appear under that heading in the **Set Injection Properties** panel.
2. 设定需要修改的属性，如下所述。
3. 点击 Apply 按钮，FLUENT 将在控制台窗口报告修改情况。
   !! 用户必须点击按钮才能保存对每个属性选项的设定。例如，若用户希望改动质量流量和随机跟踪参数，那么，就要在 v 列表中选定 Point Properties，然后，确定好质量流量，点击 Apply 按钮。对于改动随机跟踪参数，仍然要重复此过程，然后再次点击 Apply 按钮。

有两种属性类型可以直接在 Set Multiple Injection Properties 面板中进行修改。

第一种属性类型涉及如下的操作之一：
- 从某个下拉列表中选择数值
- 从按钮项中进行选择

第二种属性类型涉及如下的操作之一：
- 在某个文本区内输入数值
- 激活或禁止某个选项

第一种属性类型的设定方法与在 Set Injection Properties 面板中的设定方法相同。例如，若在 Injections Setup 下选定 Particle Type，面板就会扩展显示出 Set Injection Properties 面板中的选项，此处，就可以选定颗粒类型。只要选择好所希望的颗粒类型，点击 Apply 按钮即可。

第二种属性类型的设定需要另外的步骤。若在 Injections Setup 下选定了此种类型的属性，面板的扩展部分将具有与 Set Injection Properties 面板类似的外观，只是多了 Modify 多选框按钮（图 19.9.12）。若希望修改某个属性，激活此属性左边的 Modify 按钮，然后就可以设定这个属性了。

例如，若用户希望使用随机跟踪模型，首先需要激活 Stochastic Model 左侧的 Modify 多选框内按钮。此举将激活这个属性的设定状态。然后，在 Property 下，激活 Stochastic Model 选项即可（记住，一定要点击 Apply 按钮进行确认）。

若用户希望更改轨道计算次数（Number of Tries），激活此属性左侧的 Modify 按钮，然后输入新的次数值即可。切记，在更改完成后，点击 Apply 按钮已进行确认。

!! 没有使用 Modify 按钮进行激活的属性在用户点击 Apply 按钮之后将不会发生变化。对于已经使用 Modify 按钮激活的属性，点击 Apply 按钮之后，所有已选定的喷射源的对应属性将改变，因此，在设定属性之前，要确认这些属性的改变是恰当的。若发生误操作，并且不能在 Set Multiple Injection Properties 面板中得到修正，那就必须回到 Set Injection Properties 面板中重新修正对每个射流源的错误属性设定。

对部分已选定射流源的属性修改

需要注意的是，对于某些属性只与部分射流源相关的情况，可以只对这部分已选定射流源进行此项属性设定设定。例如，若有部分射流源使用了随机跟踪方法，而另一部分没有使用，那么，在激活 Random Eddy Lifetime 选项时，并点击 Apply 按钮之后，只有那些已经设定了随机跟踪模型的射流源才会再使用 Random Eddy Lifetime（随机涡团生存周期）方法。其它的射流源将不会受到影响。

19.10 离散相边界条件设定

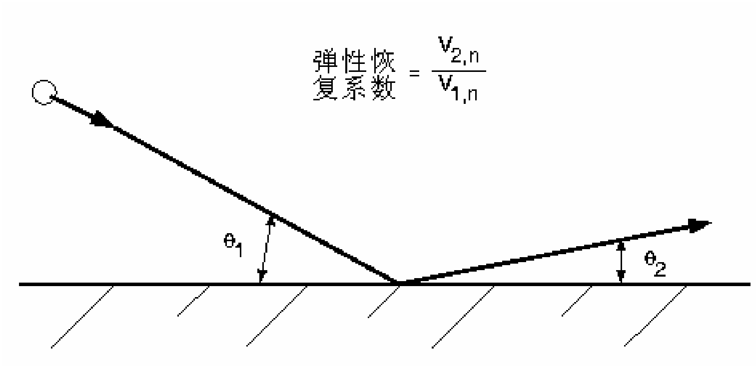
当颗粒与模型物理边界（例如壁面或入口）相交时，FLUENT 使用离散边界条件来确定轨迹在边界应该满足的条件。模型中的离散相边界条件在每个流域可以单独定义。

- 19.10.1 离散相边界条件类型
- 19.10.2 离散相边界条件的输入

19.10.1 离散相边界条件类型

正如 19.2 节所介绍的，可选的边界条件包括：

- ``reflect"边界条件：颗粒在此处反弹而发生动量变化，变化量由反弹系数确定（图 19.10.1）



图表 22 离散相的``Reflect"边界条件

法向恢复系数确定了颗粒在与壁面发生碰撞之后，其垂直于壁面方向的动量变化率[236]：

$$e_n = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}} \qquad (19.10.1)$$

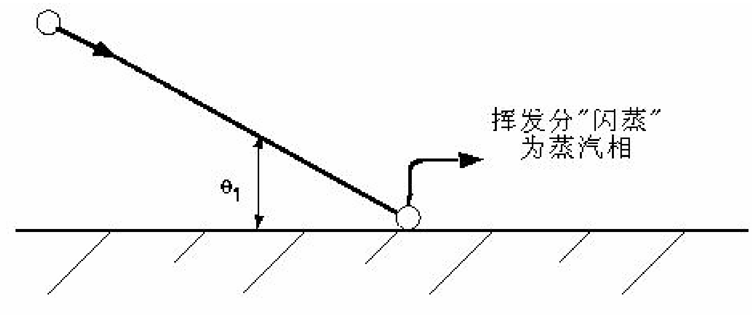
其中，v_n 为垂直壁面的法向速度分量，下标 1、2 分别表示碰撞前后的量。同理，切向恢复系数，v_t 确定了颗粒在与壁面发生碰撞之后，其与壁面相切方向的动量变化率。

法向（切向）恢复系数等于 1.0 表示颗粒在碰撞前后没有动量损失（完全弹性碰撞）。法向（切向）恢复系数等于 0.0 表示颗粒在碰撞后损失了所有的动量。

在壁面区，``reflect"边界条件可以设定为变量。恢复系数可设定为冲击角 q_1 的函数（如图 19.10.1 所示）。

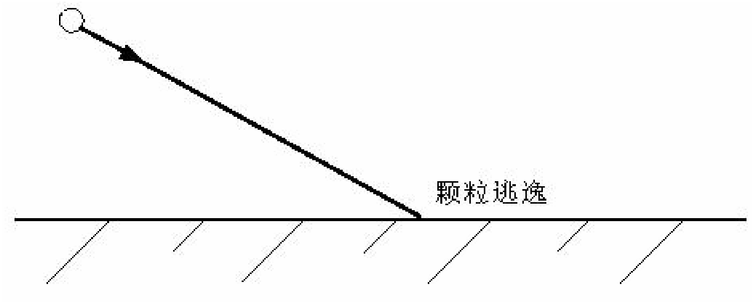
需要注意的是，两个恢复系数的缺省值均为 1.0（即不存在动量损失）。

- ``trap"边界条件：此处，颗粒终止了轨道计算，并且轨迹的结果标记为``trapped"。对于蒸发型颗粒，其全部质量瞬间转化为蒸汽相并进入与壁面相接的计算网格中（图 19.10.2）。对于燃烧型颗粒，碰撞前所剩余的挥发分转化为蒸汽相。



图表 23 离散相的``Trap"边界条件

- ``escape"边界条件：此处，颗粒被标记为``escaped"并终止了轨道计算。如图 19.10.3 所示。



图表 24 离散相的``escape"边界条件

- ``interior"边界条件 颗粒在此处将穿越内部流动区域。此选项仅对内部区域边界条件（例如，辐射体、多孔介质间断面等）是可选的。

在流动区域可以任意设定上述的边界条件，所以在 FLUENT 模型中也就可以设定混合边界条件。

缺省边界条件

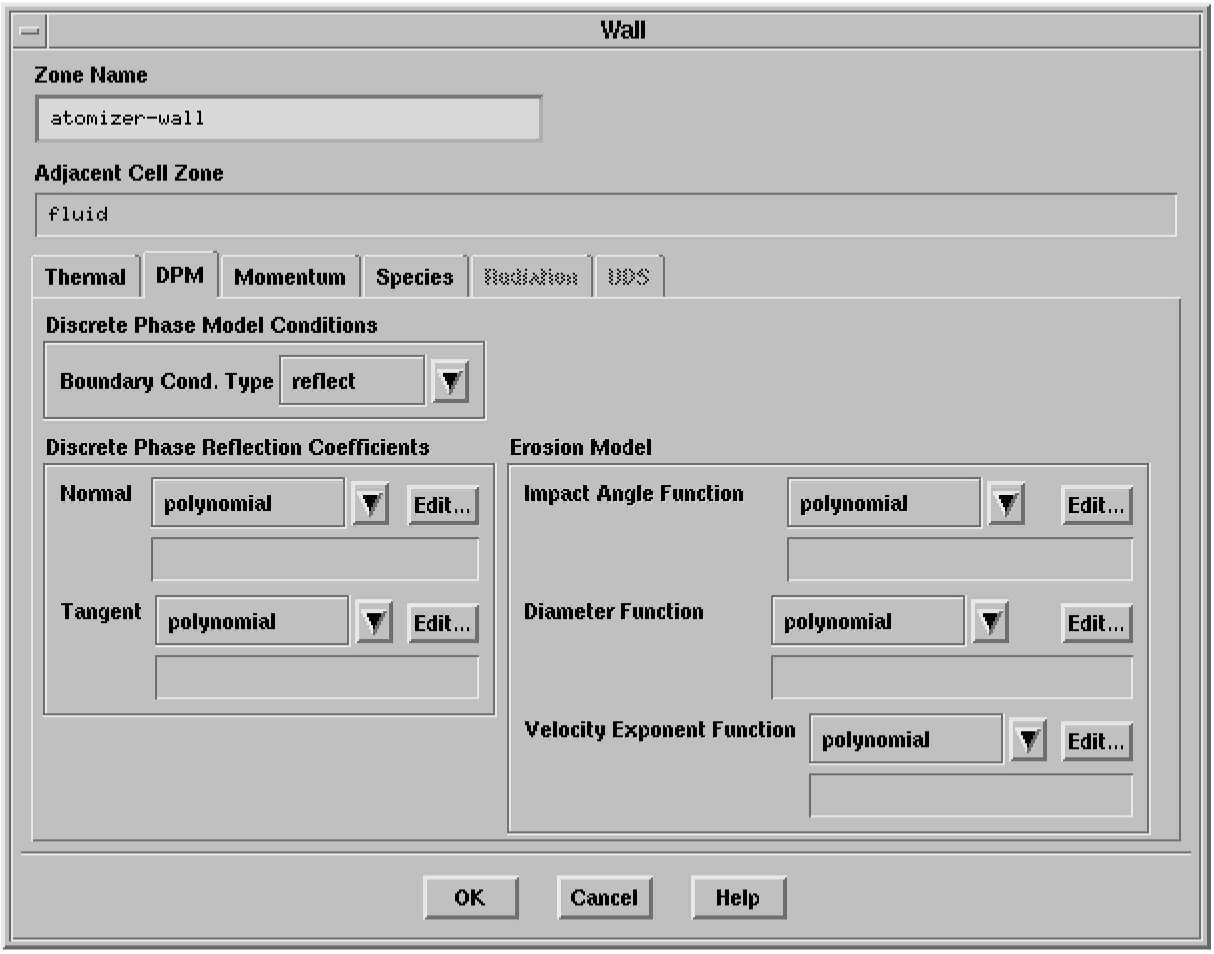
FLUENT 中的离散相缺省边界条件为;

- 壁面（wall）、对称面（symmetry）、轴对称的轴线（axis）均为``reflect"边界条件，且恢复系数均为 1.0
- 在所有的流动类型边界（压力入口-pressure inlets、速度入口-velocity inlets、压力出口-pressure outlets 等），均为``escape"边界条件
- 在所有的内部区域边界（辐射体- radiator、多孔介质间断面- porous jump）均为边界条件

只有对壁面边界（wall）才可以修改恢复系数。

19.10.2 离散相边界条件的输入

在 Boundary Conditions 面板打开的面板中可以设定离散相边界条件。当设定完一个以上的喷射源之后，离散相边界条件的输入项就会出现在相应的面板中（图 19.10.4）。



图表 25 “Wall”面板中的离散相边界条件设定面板

在 Discrete Phase Model Conditions 属性框下的 Boundary Cond. Type 下拉框中选择 Select reflect, trap, 或 escape 边界条件(在面板中,需要点击 DPM 才能激活 Discrete Phase Model Conditions)。这些边界条件的类型在 19.10.1 节中介绍。也可以选择列表框中的用户定义函数选项来定义参数。对于诸如辐射体、多孔介质间断面类型的内部流动边界，用户可以选择 interior 边界条件。interior 边界条件意味着颗粒将会穿越此内部边界。

若用户在某个 wall 边界选定了 reflect 类型边界条件（仅在 wall 边界才可选)，那么，可以在 Discrete Phase Reflection Coefficients 下把法向（切向）恢复系数定义为常数（constant)、多项表达式（polynomial)、分段线性函数（piecewise-linear)、或分段多项表达式（piecewise-polynomial)。关于边界条件类型以及恢复系数的细节请参阅 19.10.1。常数、多项表达式、分段线性函数、或分段多项表达式的定义面板与那些流动介质各种依赖于温度的属性定义相同。细节请参阅 7.1.3。

若在 Discrete Phase Model 面板中选择了 Erosion/Accretion 选项，那么，必须在壁面才能设定磨蚀速率表达式。磨蚀速率在方程 19.2-62 中定义，它是质量流率、颗粒直径函数、冲击角、速度项的乘积。在 Wall 面板中的 Erosion Model，用户可以把冲击角函数、直径函数、速度项（方程 19.2-62 中的 $f(a), C(d_p), b(v)$）定义为常数、多项表达式、分段线性函数、或分段多项表达式形式的函数。关于这些函数的定义请参阅 19.7.6，关于常数、多项表达式、分段线性函数、或分段多项表达式的定义面板请参阅 7.1.3。

19.11 设定离散相介质属性

为了使用前述章节所述的各种物理模型，以计算离散相的轨道以及传热/传质量，FLUENT 需要很多物理性质输入。

- 19.11.1 **属性输入概述**
- 19.11.2 **设定离散相介质属性**

19.11.1 属性输入概述

表 19.11.1-19.11.4 **列出了每种类型颗粒所适用的属性（输入）以及使用此输入属性的传热/传质方程。关于每个输入项的详细介绍请参阅** 19.11.2。

属性	符号
密度	r_p 方程 19.2-1
比热	c_p 方程 19.3-3
颗粒辐射发射率（黑度）	e_p 方程 19.3-3
颗粒辐射散射系数	f 方程 19.3-20
热泳力系数	$D_{T,p}$ 方程 19.2-14

表格 19.11.4 惯性颗粒的属性输入项

属性	符号
密度	r_p 方程 19.2-1
比热	c_p 方程 19.3-3
导热率	k_p 方程 19.2-15
（动力）粘度	m 方程 19.4-48
潜热	h_{fg} 方程 19.3-17
蒸发温度	T_{vap} 方程 19.3-10
沸点温度	T_{bp} 方程 19.3-10、19.3-18
挥发份含量分数	f_{v0} 方程 19.3-11、19.3-19
双元扩散系数	$D_{i,m}$ 方程 19.3-15
饱和蒸汽压	$p_{sat}(T)$ 方程 19.3-13
热解吸热量	h_{pyrol} 方程 19.5-2
液滴表面张力	s 方程 19.4-18、19.4-47

颗粒辐射发射率（黑度）	e_p **方程** 19.3-17、19.3-23
颗粒辐射散射系数	f **方程** 11.3-20
热泳力系数	$D_{T,p}$ **方程** 19.2-14

表格 19.11.5 液滴类型颗粒的属性输入项

属性	符号
密度	r_p **方程** 19.2-1
比热	c_p **方程** 19.3-3
潜热	h_{fg} **方程** 19.5-2
蒸发温度	T_{vap} **方程** 19.3-24
挥发份含量分数	f_{v0} **方程** 19.3-25
膨胀系数	C_{sw} **方程** 19.3-57
燃尽的化学计量数	S_b **方程** 19.3-64
燃烧分数	f_{comb} **方程** 19.3-63
燃尽反应放热量	H_{reac} **方程** 19.3-64、**方程** 19.3-78
反应放热中加热固体的分数	f_h **方程** 19.3-78
颗粒辐射发射率（黑度）	e_p **方程** 19.3-58、19.3-78
颗粒辐射散射系数	f **方程** 11.3-20
热泳力系数	$D_{T,p}$ **方程** 19.2-14
挥发份析出模型	
-定律 4，常速率	
常数	A_0 **方程** 19.3-26
-定律 4，单步反应	
指前因子	A_1 **方程** 19.3-27
活化能	E **方程** 19.3-27

-定律 4，两步反应	
指前因子	A_1, A_2 方程 19.3-30、方程 19.3-31
活化能	E_1, E_2 方程 19.3-30、方程 19.3-31
加权系数	a_1, a_2 方程 19.3-32
-定律 4，CPD 模型	
煤炭网络中的初始桥键分数	p_0 方程 19.3-43
初始炭桥键分数	c_0 方程 19.3-42
网络配位数	$s+1$ 方程 19.3-54
官能团分子量	$M_{w,1}$ 方程 19.3-54
侧链官能团分子量	$M_{w,d}$ 方程 19.3-53

表格 19.11.3 燃烧类型颗粒的属性输入项（定律 1-4）

属性	符号
燃烧模型	
-定律 5，扩散控制模型	
双（组）元扩散系数	$D_{i,m}$ 方程 19.3-65
-定律 5，扩散/动力学控制模型	
质量扩散速率常数	C_1 方程 19.3-66
动力学中的指前因子	C_2 方程 19.3-67
动力学中的活化能	E 方程 19.3-67
-定律 5，内部扩散控制模型	
质量扩散系数	C_1 方程 19.3-66
动力学中的指前因子	A_i 方程 19.3-76
动力学中的活化能	E_i 方程 19.3-76
炭粒孔隙度	q 方程 19.3-73
平均孔隙半径	$\bar{r}_p$ 方程 19.3-75
内部比表面积	A_g 方程 19.3-70、方程 19.3-72
孔隙与外表面交角	t 方程 19.3-73
燃烬模型常数	a 方程 19.3-77
-定律 5，表面反应控制模型	
双（组）元扩散系数	$D_{i,m}$ 方程 19.3-65

表格 19.11.4 燃烧类型颗粒的属性输入项（定律 5）

19.11.2 设定离散相的物性

离散相物性概念

当用户创建一个射流源时，或者是对离散相设定初始条件（清参阅 19.9）是，必须要为颗粒（离散相）选定某个材质，这种材质的所有颗粒流具备相同的物理性质。

离散相物性共有三大类，相应的对应着三种可定义的颗粒类型.这些颗粒材质类型分别为:惯性颗粒 inert-particle，液滴 droplet-particle，和 燃烧类型颗粒 combusting-particle. 当在定义好某个射流源之后(在 Set Injection Properties 或 Set Multiple Injection Properties 面板中定义,请参阅 19.9),相应的颗粒材质类型就会被添加到 Materials panel 中的 Material Type 列表中去.在用户第一次定义射流源的特定颗粒类型时,可以中材质数据库直接拷贝某个材质,此种颗粒材质将变为这种颗粒类型的缺省材质类型.即,此时再创建这种颗粒类型的新射流源时,用户已经选定的颗粒材质就是这个新定义的射流源的颗粒材质.如需要的话,用户可以修改预设的颗粒材质的各种性质(请参阅 7.1.2).若需要对多个同一类型颗粒的材质设定某些性质,那么.不需要用户重复定义颗粒物性,只要对所有颗粒选定相同颗粒材质就可以了.

!!需要注意的是,只有用户定义了某种类型的颗粒射流源之后,在 Materials 面板中的 Material Type 列表才会出现此种类型颗粒的材质.即是说,若用户未定义燃烧颗粒射流源(请参阅 19.9),那么,将不能定义或修改任何燃烧类型颗粒的材质.

定义附加的离散相物性

多数情况下,对于某个给定的模型,设定离散相颗粒的一些简单物理性质(密度.比热等)就可以了.但有时,在单个模型中可能包含两种不同类型的惯性,液滴或燃烧颗粒(例如较重颗粒和气泡,或者是两种不同的蒸发性液滴).在这种情况下,用户需要对这两种(或更多)不同颗粒设定不同的物性.只要定义两种以上的惯性,液滴或燃烧类型颗粒,然后分别设定相应的属性就可以处理这个问题.

用户可以通过从数据库中复制,或者逐步设定来定义附加的离散相物性.关于如何使用 Materials panel 面板,请参阅 7.1.2 节.

!!在定义某种类型的附加离散相物性时,用户需要首先对这种类型颗粒定义至少一个射流源(请参阅 19.9 节).

颗粒物性介绍

在 Materials panel 面板中出现的可选的属性项依赖于颗粒类型(在 Set Injection Properties 或 Set Multiple Injection Properties 面板中设定,请参阅 19.9.5,19.9.17)和用户使用的物理模型而有所不同.

下面列出了对离散相可设定的所有属性项.对于每种类型颗粒,对应的属性项请参阅表 19.11.1-19.11.4.

Density：

离散相单位体积所包含的质量，即颗粒相密度。此密度为质量密度而不是体积密度。因为一些颗粒在其轨道计算过程中可能会发生膨胀，所以用户设定的实际上是“初始”密度。

Cp ：

即颗粒比热 c_p。从 Cp 右边的下拉列表中可以选择依赖于温度而变化的比热。关于随温度变化的比热设定，请参阅 7.1.3 节。

Thermal Conductivity：

颗粒导热率。单位是国际单位制中的 W/m-K，或是英制单位中 Btu/ft-h-°F 的，在 FLUENT 中，它被视作常数。

Latent Heat:

蒸发潜热，h_{fg}，在蒸发性液滴发生相变（方程 19.3-17）或燃烧类型颗粒挥发分析出（方程 19.3-58）时需要用到这个参数。单位是国际单位制中的 J/kg，或是英制单位中 Btu/lb_m的，在 FLUENT 中，它被视作常数。

Thermophoretic Coefficient:

方程 19.2-14 中的热泳力系数 $D_{T,p}$，当颗粒轨道计算考虑热泳力的影响时（即在 the **Discrete Phase Model** 面板中激活了 **Thermophoretic Force** 选项，请参阅 19.2.1），需要使用此参数。缺省情况下，FLUENT 使用由 Talbot [237] 得到的计算表达式（**talbot** 扩散系数－**talbot-diffusion-coeff**），此模型不需要用户的输入设定。通过在 **Thermophoretic Coefficient** 右边的下拉列表，用户可以选定某种函数形式来设定依赖于温度而变化的热泳力系数。关于设定依赖于温度而变化的物理量的设定请参阅 7.1.3 节。

Vaporization Temperature：

蒸发（临界）温度，T_{vap}，达到这个温度值时，液滴或者燃烧类型颗粒的脱挥发分就开始进

行计算，而在此温度之前，颗粒的加热使用定律 1，即方程 19.3-3。此温度值仅表示某个模型的设定值而不是离散相的实际物理属性。

Boiling Point：

沸腾温度，T_{bp}，达到这个温度值时，FLUENT 开始计算沸腾速率（方程）。当液滴颗粒达到沸点温度时，FLUENT 使用定律 3，并且假定液滴温度恒为 T_{bp}。沸点应该在 **Operating Conditions** panel.面板中设定为系统压力下的饱和蒸汽温度。

Volatile Component Fraction：

挥发分的（质量）分数，f_{v0}，它是由定律 2 与／或定律 3（请参阅 19.3.3、19.3.4）所确定的液滴颗粒中所含的蒸发性成分，或者是由定律 4（请参阅 19.3.5）所确定的挥发性成分。

Binary Diffusivity：

蒸发定律 2（方程 19.3-15）中所用到的质量扩散系数，$D_{i,m}$。此项输入也可以用来定义方程 19.3-65 中氧化剂组分向燃烧颗粒表面的质量扩散，$D_{i,m}$（需要注意的是，用户对连续相设定的扩散系数不是用于离散相）。

Saturation Vapor Pressure：

饱和蒸气压，p_{sat}，定义为温度的函数。用于蒸发定律 2（方程 19.3-13）。通过在颗粒名称右边的下拉列表，用户可以选定某种函数形式来设定依赖于温度而变化的饱和蒸汽压（关于设定依赖于温度而变化的物理量的设定请参阅 7.1.3 节）。为防止误输入，FLUENT 限定 p_{sat} 的范围为 0.0-工作压力之间。真实蒸气压数据的正确输入对蒸发过程的精确模拟是必需的。

Heat of Pyrolysis：

瞬态热解过程的释热量，h_{pyrol}，蒸发性／沸腾性组分将携带这些热量释放到连续相。此项输入表示了蒸发过程中蒸发性组分转变为较轻的组份。对于放热反应，热解热应设定为正值，若为吸热反应，应设定为负值。缺省值为 0，表示不考虑热解热。此项输入用于方程 19.5-2。

Swelling Coefficient：

方程 19.3-57 中的膨胀系数，C_{sw}，在用定律 4（请参阅 19.3.5）计算脱挥发分过程时，它确定了煤粉颗粒的膨胀。若膨胀系数等于 1（缺省值），那么，煤粉颗粒在脱挥发分过程中直径不发生变化。

Burnout Stoichiometric Ratio：

方程 19.3-64 中的（煤粉炭核）燃尽反应的化学计量比，S_b，即单位质量焦炭燃烧所需要的氧化剂质量。

Combustible Fraction：

煤粉颗粒中的焦炭质量分数，f_{comb}，即参加表面反应（定律 5，方程 19.3-63）的煤粉中可燃烧的分数。

Heat of Reaction for Burnout：

焦炭表面反应（定律 5，方程 19.3-64）的燃烬反应释热量。此项参数的意义为表面反应所消耗的单位质量焦炭产生的热量。

React. Heat Fraction Absorbed by Solid：

方程 19.3-78 中的参数 f_h。它确定了反应热在颗粒与连续相之间的分配。缺省值为 0，表示反应释热全部由连续相所吸收。

Devolatilization Model：

确定定律 4 使用何种脱挥发分模型。若想使用常速率脱挥发分模型（方程 19.3-26），在 Devolatilization Model 的右边的下拉列表中选定 constant，然后在列表下方区域输入反应常数 A_0 即可。

若希望使用其它的脱挥发分模型（19.3.5 节所介绍的单步反应速率模型、两步反应速率模型或者是 CPD 模型），那么，可在下拉列表中相应的选择 single rate, two-competing-rates 或者 cpd-model。

当选定单步反应速率模型（ single-rate）时，会弹出 the Single Rate Devolatilization Model panel 面板，用户需要输入指前因子（Pre-exponential Factor） A_1 以及活化能（Activation Energy） E，它们用来在方程 19.3-28 中计算反应速率。

当选定两步竞争反应速率模型时，会弹出面板，用户需要分别对两步反应输入指前因子（Pre-exponential Factor）-方程 19.3-30 中的 A_1、方程 19.3-31 总的 A_2，活化能（Activation Energy）-方程 19.3-30 中的 E_1、方程 19.3-31 总的 E_2 以及加权系数（Weighting Factor）-方程 19.3-32 中的 a_1、a_2。用户输入的各个参数用于方程 19.3-30～32 的计算。

当选定化学渗透模型（cpd-model）时，会弹出 CPD Model 面板。用户需要输入初始焦炭网络的桥键分数（Initial Fraction of Bridges in Coal Lattice，方程 19.3-43 中的 p_0）、初始碳一碳键分数（Initial Fraction of Char Bridges，方程 19.3-42 中的 c_0）、配位数（Lattice Coordination Number，方程 19.3-54 中的 $s+1$）、单体分子量（Cluster Molecular Weight，方程 19.3-54 中的 $M_{w,1}$）以及侧链基元分子量（Side Chain Molecular Weight，方程 19.3-53 中的 $M_{w,d}$）。

需要注意的是 Single Rate Devolatilization Model, Two Competing Rates Model, 和 CPD Model 面板是对话框类型的面板，所以，用户在继续定义其它物性之前必须先定义好这些模型属性。

Combustion Model：

定义定律 5 使用那种表面焦炭反应模型。若希望使用缺省的扩散控制燃烧模型，在 Combustion Model 右边的下拉列表中选定 diffusion-limited 即可。因为上述的双元扩散系数（用于方程 19.3-65）已经被定义，所以不再需要输入参数。

若要使用扩散－动力学控制反应速率模型，可在下拉列表中选定 kinetics/diffusion-limited。Kinetics/Diffusion Limited Combustion Model panel 面板就会弹出，在此面板中输入质量扩

散系数（Mass Diffusion Limited Rate Constant，方程 19.3-66 中的C_1）、动力学中的指前因子（方程 19.3-67 中的C_2）和活化能（方程 19.3-67 中的E）。

需要注意的是 Kinetics/Diffusion Limited Combustion Model 面板是对话框类型的面板，所以，用户在继续定义其它物性之前必须先定义好这些模型属性。

若希望使用内部渗透模型，可在下拉列表中选定 intrinsic-model。Intrinsic Combustion Model panel 面板就会弹出，在此面板中输入质量扩散系数（Mass Diffusion Limited Rate Constant，方程 19.3-66 中的C_1）、动力学中的指前因子（方程 19.3-76 中的A_i）、活化能（方程 19.3-76 中的E_i）、焦炭孔隙度（Char Porosity，方程 19.3-73 中的q）、平均孔隙半径（Mean Pore Radius，方程 1.3-75 中的$\overline{r_p}$）、比表面积（Specific Internal Surface Area 方程 19.3-70、19.3-72 中的A_g）、扭曲度（Tortuosity，方程 19.3-73 中的t）以及燃尽模型常数（Burning Mode, alpha，方程 19.3-77 中的a）。

需要注意的是 Intrinsic Combustion Model 面板是对话框类型的面板，所以，用户在继续定义其它物性之前必须先定义好这些模型属性。

若希望使用多表面反应模型，可在下拉列表中选定 multiple-surface-reactions。FLUENT 会弹出一个对话框，告诉用户需要打开 Reactions 面板，在此面板中可以查看或者修改用户已经设定好的各种模型及参数（请参阅 13.1.2 节）。

!! 若用户还未定义任何颗粒表面反应，那么，此时必须要设定。关于多表面反应模型，请参阅 13.3.3 节。

用户会被告知在 Materials 面板中 Burnout Stoichiometric Ratio 和 Heat of Reaction for Burnout 属性将不再是可选的。这是由于这些参数现在已由用户在面板中的定义的颗粒表面反应计算得到。

需要注意的是只有在 Species Model 面板中的 Reactions 选项中激活 Particle Surface 选项，多表面反应模型才是可选的。细节请参阅 13.3.2 节。

当在 Discrete Phase Model panel 面板中激活颗粒辐射选项（仅适用于 P-1 或离散坐标辐射模型）时，用户需要定义如下的参数：

Particle Emissivity

即模型中的颗粒辐射发射率e_p，当激活 P-1 或离散坐标辐射模型时，它可用于计算对颗粒的辐射传热（方程 19.3-3、19.3-17、19.3-58、19.3-78）。需要注意的是用户必须在 Discrete Phase Model panel 面板中激活 Particle Radiation Interaction 选项以考虑颗粒的辐射效应。对于煤粉颗粒推荐使用颗粒发射率 1.0，灰分为 0.5[143]。

Particle Scattering Factor：

在 P-1 或离散坐标辐射模（方程 11.3-20）使用的颗粒散射系数f_p。需要注意的是用户必须在 Discrete Phase Model panel 面板中激活 Particle Radiation Interaction 选项以考虑颗粒的辐射效应。对于煤粉颗粒的f_p推荐值为 0.9[143]。另外，如果考虑颗粒辐射，那么，连续相的（辐射）散射将被忽略。

当在 the **Set Injection Properties** panel **（雾化）或（和）** or **Discrete Phase Model** panel **（射流液膜破碎／颗粒碰撞）面板中设定了喷嘴雾化、液膜破碎、颗粒碰撞模型时，用户还需要定义如下的参数：**

Viscosity：

即液滴粘度 m_l **。从 Viscosity 右边的下拉列表中可以选择依赖于温度而变化的比热。关于随温度变化的比热设定，请参阅** 7.1.3 **节。用户也可以使用用户定义函数来模拟液滴粘度。关于用户定义函数请参阅** UDF **手册。**

Droplet Surface Tension

即液滴表面张力 s **。从 Droplet Surface Tension 右边的下拉列表中可以选择依赖于温度而变化的比热。关于随温度变化的比热设定，请参阅** 7.1.3 **节。用户也可以使用用户定义函数来模拟液滴粘度。关于用户定义函数请参阅** UDF **手册。**

19.12 离散相计算过程

离散相的求解意味着对颗粒的受力平衡方程（方程 19.2-1**）对时间项进行积分从而得到颗粒的轨迹。当颗粒沿着其轨道运动时，颗粒与连续相间的传热、传质经由传热**/**质定律（请参阅** 19.3**）得到。因此，离散相计算结果的精度以来依赖于积分时间尺度以及相间的耦合程度。** 19.12.1 **节介绍了数值求解的控制方法。**19.12.2 **节介绍颗粒轨迹的耦合计算过程；**19.12.3 **和** 19.12.4 **节分别介绍相间交换项的重置以及离散相的并行计算方法**

- 19.12.1 **控制数值积分算法的参数** Parameters Controlling the Numerical Integration
- 19.12.2 **颗粒轨道计算** Performing Trajectory Calculations
- 19.12.3 **相间交换项的重置** Resetting the Interphase Exchange Terms
- 19.12.4 **离散相的并行计算** Parallel Processing for the Discrete Phase Model

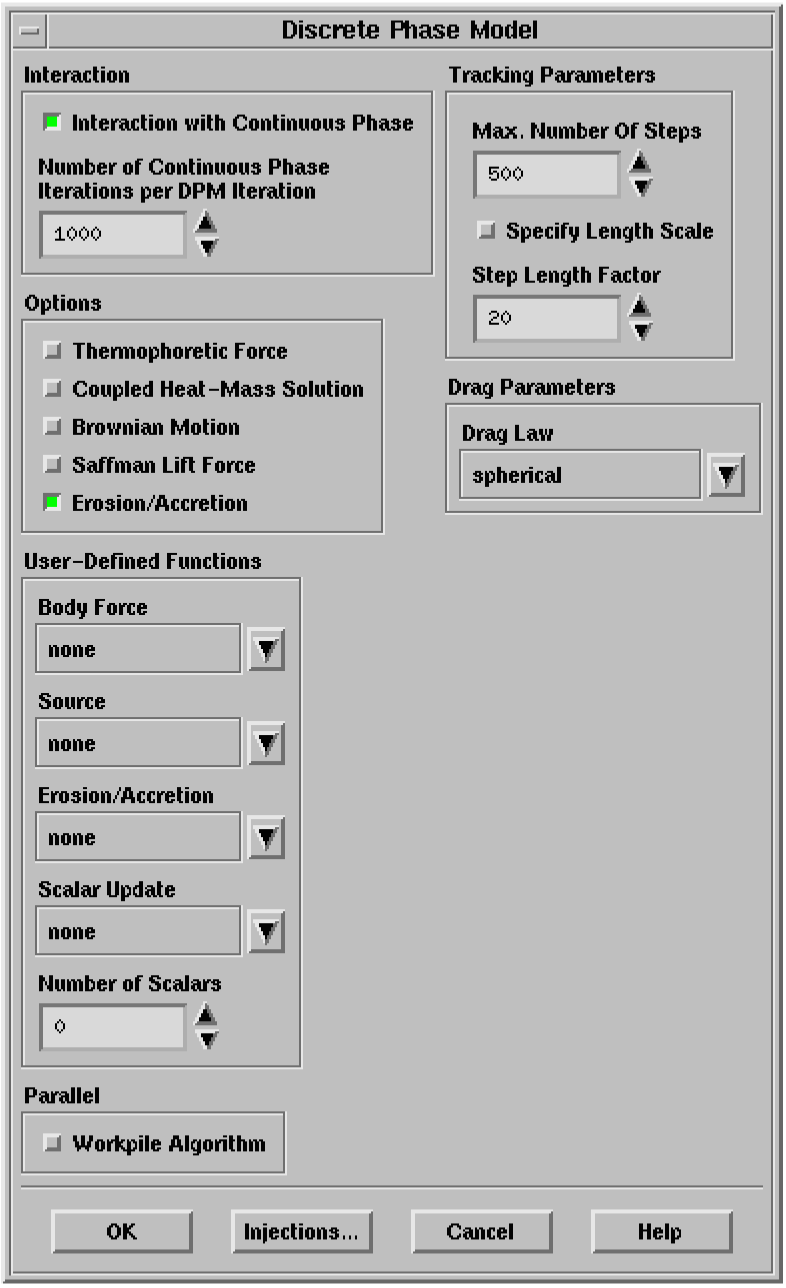
19.12.1 控制数值积分算法的参数

用户可以使用两个参数来控制颗粒轨道计算时时间积分项：

- **长度标尺或步长因子，可用来设定每个控制体内的积分时间步长**
- **最大的积分时间步数，当颗粒始终悬停在计算域时，可用来终止轨道的计算**

这些参数可以在 Discrete Phase Model panel **面板中的 Tracking Parameters 选项下设定：**

Define → Models → Discrete Phase...



图表 19.12.26 离散相模型面板

最大计算步数（Max. Number Of Steps）

是积分方程 19.2-1，19.2-21 以求解颗粒轨道时，允许的最大时间步数。当某个颗粒轨道计算达到此时间步数时，FLUENT 就自动中止了此颗粒的轨道计算，输出时，此颗粒被标记为“incomplete”。对最大时间步数的规定消除了对某些在流场中不停循环的颗粒的无休止的计算。但是，对于缺省的 500 步的最大时间步数，很多问题的计算都不止这么多。这种情况下，当颗粒信息在输出时被标记未完成，而实际颗粒并不是在流场中无休止的打转，那么，用户可以增加最大时间步数（最多增加到 10^9）。

积分尺度（Length Scale）

控制颗粒运动方程中的积分时间步长。此步长在 FLUENT 中有一个长度标尺 L 和颗粒速度（u_p）连续相速度（u_c）确定：

$$\Delta t=\frac{L}{u_p+u_c} \qquad (19.12.1)$$

其中 L 为由用户定义的长度标尺。正如方程 19.12-1 所定义的那样，与积分时间步长成正比，并且等于在颗粒运动方程求解之前以及颗粒轨迹未更新之前，颗粒所穿过的距离。较小的长度标尺意味着更高的颗粒轨道以及相应的离散相的传热、传质相间耦合的求解精度。（需要注意的是，当颗粒进出计算控制体时，均需要计算颗粒的位置。即使用户设定了很大的长度标尺，用于积分计算的时间步仍然会保证颗粒在一个步长内穿越单个计算网格）。当激活 Specify Length Scale 选项时，Discrete Phase Model 面板中的 Length Scale 就会出现。

时间步长因子（Step Length Factor）

也可以用来控制对颗粒运动方程的积分时间步长。其与 Length Scale 的不同处在于这种方法依据颗粒穿越一个计算网格所需要的时间步数来确定一个时间步长。要设定此项参数，而不设定 the Length Scale，请禁止 Specify Length Scale 选项。

FLUENT 给予某个特征时间来计算积分时间步长。此特征时间由颗粒穿越当前连续相计算网格所需时间来估计。若此估计时间记为 Δt^*，那么 FLUENT 说确定的积分时间 Δt 为：

$$\Delta t=\frac{\Delta t^*}{l} \qquad (19.12.2)$$

其中，l 为步长因子（Step Length Factor），由方程 19.12.2 定义。l 与积分时间步长成反比，并且大致等于颗粒穿越计算网格所需要的时间步数。步长因子越大，则积分时间步长越短。缺省的步长因子为 20。

设定上述各个参数的一个简便方法是，若用户希望颗粒穿越长度为 D 的计算域，那么用长度标尺乘以最大积分时间步数，其结果应该大致等于 D。

19.12.2 颗粒轨道计算

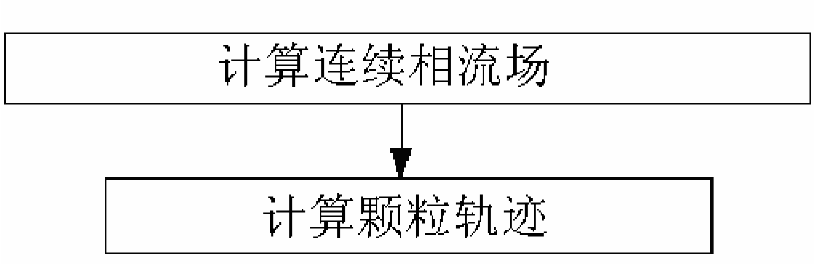
当用户在图形面板中显示颗粒轨道，或者是在迭代计算过程中，程序就计算由喷射源开始的颗粒轨道。这就是说，用户可以不计颗粒对连续相的影响而直接显示其轨迹，或者是考虑颗粒对连续相的影响（即相间耦合）。在湍流流动中，颗粒轨道既可以给予连续相的时均速度也可以是瞬态速度。这一节介绍用户进行颗粒（非）耦合、（不）考虑随机跟踪、颗粒云跟踪计算所需要的步骤及各种命令。

非耦合计算

对于非耦合计算，用户的设定步骤如下：

1. 计算连续相流场
2. 显示（文本输出）相关的、从喷射源开始的颗粒轨道

对于非耦合计算方法，上述两个步骤就完成了其设定，如图 19.12.2 所示。颗粒轨迹在其显示的时候开始计算。计算是基于连续相的流场计算结果。关于颗粒轨迹的图形显示与文本输出选项请参阅 19.13 节。



图表 19.12.27 非耦合离散项计算过程

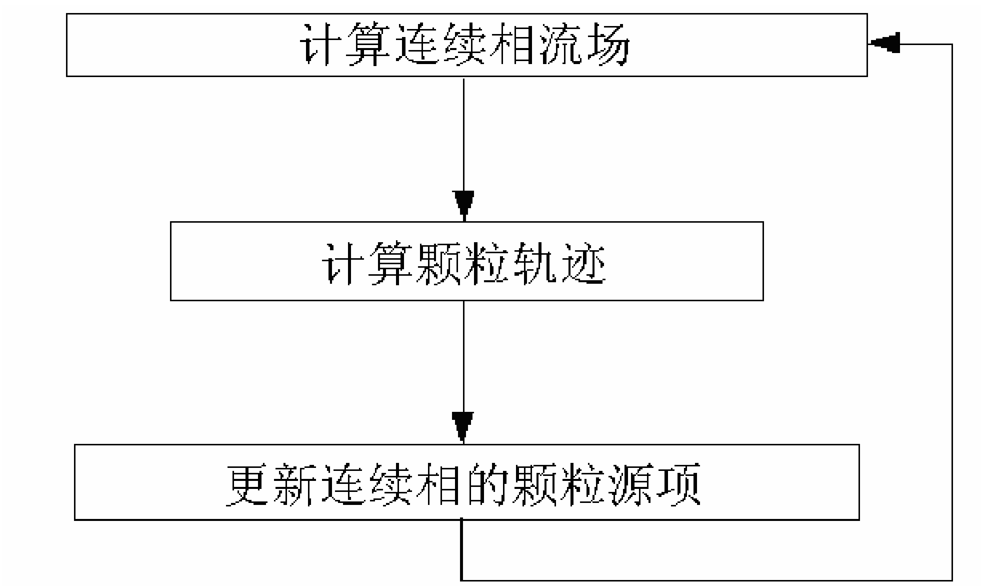
当离散项在流场中的质量及动量承载率很低时，这种方法是适宜的。在这种情况下，连续相流场不受离散相的影响。

耦合计算

在耦合两相计算中，FLUENT 将上述的两步过程修正为：

1. **计算连续相流场（此时计算域中不存在离散相）**
2. **计算从每个喷射源开始的颗粒轨道，从而在计算域中引入离散相**
3. **使用已经得到的颗粒计算结果中的相间动量、热量、质量交换项重新计算连续相流场**
4. **计算修正后的连续相流场中的颗粒轨迹**
5. **重复上述两个步骤，直到获得收敛解。结果收敛时，连续相与离散相的计算结果都不会因为继续耦合计算而发生改变**

上述的耦合过程如图 19.12.3 所示。当用户的问题包含较高的质量/动量承载率时，为了考虑离散相对连续相的影响，必须使用上述的方法。



图表 19.12.28 相间耦合计算过程

!! 当用户进行相间耦合计算时，所有已经定义的喷射源都需要计算。不可能仅仅计算定义的部分喷射源。

两相耦合计算过程

当模拟两相耦合过程时，用户应该首先计算得到收敛或部分收敛的连续相流场，然后再创建喷射源进行耦合计算。

在每一轮离散相的计算，FLUENT 计算颗粒/液滴轨迹并且更新每一个流体计算单元内的相

间动量、热量以及质量交换项。然后，这些交换项就会作用到随后的连续相的计算。耦合计算时，FLUENT 在连续相迭代计算的过程中，按照一定的迭代步数间隔来计算离散相迭代。直到连续相的流场计算结果不再随着迭代步数加大而发生变化（即，达到了所有的收敛标准），耦合计算才会停止。当达到收敛时，离散相的轨迹也不再发生变化（若离散相轨迹发生变化将会导致连续相流场的变化）。

耦合计算的设定步骤如下：

1. 计算连续相流场
2. 在 **Discrete Phase Model** panel 面板中，激活 **Interaction with Continuous Phase** 选项
3. 在 **Number Of Continuous Phase Iterations Per DPM Iteration** 文本框中设定颗粒轨迹的计算频率（即连续相迭代多少步，就进行一轮离散相的计算）。若用户设定此参数为 5，即意味着在连续相进行了五步迭代之后，就开始离散相的迭代计算。两个离散相计算中间应该间隔多少连续相的迭代步，要视用户问题的物理意义而定。

!! 需要注意的是，若此参数设定为 0，那么 FLUENT 将不进行离散相的计算。

在耦合计算（在 **Iterate** panel 面板里进行初始化之后）进行过程中，用户会在 FLUENT 控制台窗口看到如下显示：

```
iter continuity x-velocity y-velocity          k     epsilon      energy time/ite
 314 2.5249e-01 2.8657e-01 1.0533e+00 7.6227e-02 2.9771e-02 9.8181e-03  0:00:05
 315 2.7955e-01 2.5867e-01 9.2736e-01 6.4516e-02 2.6545e-02 4.2314e-03  0:00:03

DPM Iteration ....
number tracked= 9, number escaped= 1, aborted= 0, trapped= 0, evaporated = 8, i
Done.
 316 1.9206e-01 1.1860e-01 6.9573e-01 5.2692e-02 2.3997e-02 2.4532e-03  0:00:02
 317 2.0729e-01 3.2982e-02 8.3036e-01 4.1649e-02 2.2111e-02 2.5369e-01  0:00:01
 318 3.2820e-01 5.5508e-02 6.0900e-01 5.9018e-02 2.6619e-02 4.0394e-02  0:00:00
```

需要注意的是，用户可以在任何时候使用命令 `solve/dpm-update` 来进行离散相的计算。

耦合计算中的随机跟踪方法

若在耦合计算中，用户使用了湍流扩散的随机方法，那么，随机轨道计算的数目等于用户在 **Set Injection Properties** panel 面板中的 **Number of Tries** 文本框中设定的数目。此参数的设定请参阅 19.9.15。

需要注意的是，若用户想要用基于连续相时均流场来进行耦合计算，应将随机计算次数设定为 0。若 $n \geq 1$，对于每个喷射源的颗粒，程序都会执行 n 次随机轨道计算。还需要注意的是，当随机轨道的计算次数较小时，用户可能会发现每次在进行轨道计算时，颗粒轨道的系综平均差别很大。这种差别反过来会影响到耦合计算的收敛。因此，用户在进行耦合计算时应包含尽足够多的随机轨道计算次数。

相间交换项的亚松弛方法

对稳态耦合计算，当使用上述的方法时，FLUENT 对相间动量、热量、质量交换项使用亚松弛算法。此算法通过渐次的考虑离散相的影响而增强了耦合计算的稳定性。

$$E_{new} = E_{old} + a\left(E_{calculated} - E_{old}\right) \qquad (19.12.3)$$

其中，E_{new} 为相间交换项，E_{old} 为上一轮计算值，$E_{calculated}$ 为此一轮得到的新值，a 为颗粒/液滴亚松弛因子。a 在 FLUENT 中的缺省值为 0.5。用户可以在 **Solution Controls** panel 面板中的 **Discrete Phase Sources** 属性框下的 **Under-Relaxation Factors** 文本框中设定此参

数。为了增强离散相的耦合计算稳定性，用户需要减小此数值。

19.12.3 相间交换项的重新设定（重置）

若耦合计算已经开始了，再计算中产生了非 0 的相间动量、热量或质量源项，而用户不想在随后的计算中再考虑此源项，那么，用户可以将其置为 0。

Solve → Initialize → Reset DPM Sources

当用户选择了 Reset DPM Sources 菜单项时，颗粒源项将立刻置为 0，此过程没有任何确认（提示）窗口产生。

19.12.4 离散相的并行计算

若用户在共享内存的多处理器的计算机(请查阅并行计算权限的版本说明)上运行 FLUENT，那么，用户需要显式声明其要执行并行离散相计算。在 Discrete Phase Model 面板中，激活 Workpile Algorithm 选项（在 Parallel 属性框中)，然后设定线程数目。缺省情况下，线程数等于用户为并行求解器中设定的计算机结点数。用户可以基于颗粒计算量来修改此数值。例如，若颗粒计算量要大于连续相的计算量，那么，用户可以增加线程数（最多到可以使用的处理器数目）以提高计算效率。

需要注意的是，当在分布式内存计算机或计算机机群（集群）环境中进行并行计算时，仍然可以使用离散相模型。但是，当在共享内存的计算机上运行时，颗粒计算将全部由主线程（Host process）承担。所以，执行主线程的计算机必须要有足够的内存以存储计算域内的网格。这种情况下，线程数不应超过主节点计算机（host machine）上的 CPU 数目。

19.13 离散相的后处理

在用户完成离散相的设定并进行了相关的耦合相间计算之后,用户可以显示或者存储颗粒轨道的计算结果。FLUENT 提供的离散相的图形与文本输出功能如下：

- **颗粒轨道的图形显示**
- **颗粒轨道结局的输出**
- **颗粒位置、速度、温度以及直径的逐步输出**
- **相间交换项的文本输出与图形显示**
- **在边界以及直线、平面的轨道采样**
- **采样平面的颗粒轨道历史数据**
- **颗粒磨蚀/沉积显示**

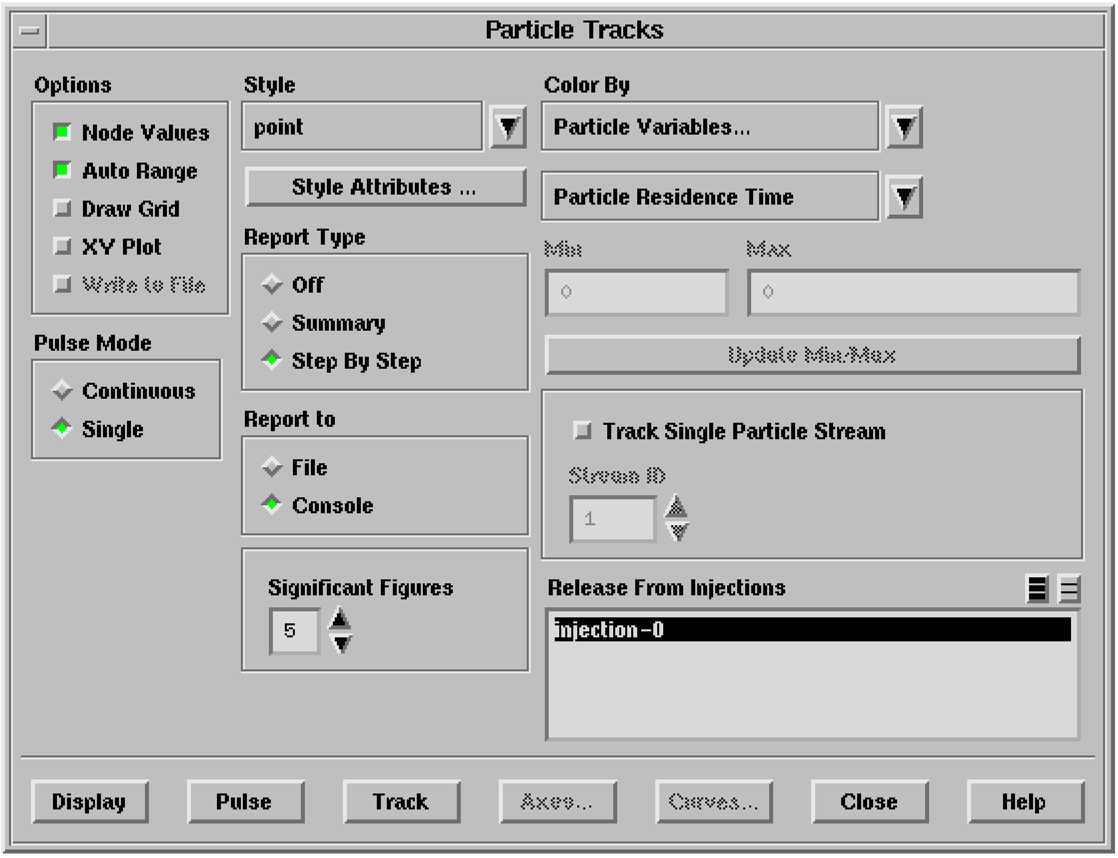
这一节详细介绍实现上述功能的各种相关选项
（需要注意的是图示或文本输出并不改变颗粒源项）

- 19.13.1 Graphical Display of Trajectories **轨道的图形显示**
- 19.13.2 Reporting of Trajectory Fates **轨道结局的输出**
- 19.13.3 Step-by-Step Reporting of Trajectories **轨道的逐步输出**
- 19.13.4 Reporting Current Positions for Unsteady Tracking **非稳态跟踪中的当前颗粒位置输出**
- 19.13.5 Reporting of Interphase Exchange Terms and Discrete Phase Concentration **相间交换项以及离散相浓度的输出**
- 19.13.6 Trajectory Sampling **轨道的采样**
- 19.13.7 Histogram Reporting of Samples **采样的历史数据**
- 19.13.8 Postprocessing of Erosion/Accretion Rates **磨蚀/沉积的后处理**

19.13.1 Graphical Display of Trajectories 轨道的图形显示

定义完离散相颗粒喷射源（请参阅 19.9**）之后，用户可以在 Particle Tracks** panel **面板（图** 19.13.1**）中显示离散相的轨道。**

Display → Particle Tracks...



图表 29 颗粒跟踪面板

显示颗粒重喷射源开始的颗粒轨道的设定步骤如下：

1. 在 Release From Injections 列表框中选择希望跟踪的颗粒喷射源（也可以选定跟踪特定的颗粒，请参阅下面介绍）。
2. 在 Discrete Phase Model panel 面板中设定长度标尺以及最大跟踪步数（请参阅 19.12.1）。

   Define →Models →Discrete Phase...

   若希望使用随机跟踪或颗粒云模型，请在 Set Injection Properties 面板中设定相应的选项（请参阅 19.9.15）。
3. 选定一个如下所述的显示选项
4. 点击 Compute 按钮。需要注意的是在非稳态颗粒跟踪时，Compute 按钮将变成 Start 按钮（用来初始化颗粒）或者 Stop 按钮
5. 点击 Display 按钮来显示颗粒轨道，而点击 Pulse 按钮可以动态显示颗粒的位置。此时，Pulse 按钮敬将变为 Stop！按钮，用户只有点击 Stop！按钮才可以终止此过程。
6. !! 对于非稳态颗粒跟踪模拟，点击 Display 按钮将显示颗粒的当前位置。通常，用户应该在 Style 下拉菜单下选择 point 来显示瞬态颗粒在那一点开始显示。菲稳态颗粒跟踪时，Pulse 按钮是不可选的。

为显示而定义单个颗粒

可以仅显示某个喷射源的单个颗粒轨道而不是所有的颗粒流。为此，用户应首先确定所需要显示的颗粒。在 Injections panel 面板中列出需要显示的喷射源的颗粒流（请参阅 19.9.4）。

Define →Injections...

需要注意的是。在打印到 FLUENT 控制台的颗粒列表中，第一行显示的是颗粒的标识号

(ID)。然后，紧接着上述的第一步依次执行下述步骤：

1. 在 **Particle Tracks** panel.面板中激活 **Track Single Particle Stream** 选项。
2. 在文本框中选定用户希望显示的某个颗粒流的标识号。

颗粒轨迹显示选项

上面提到的选项包括如下内容：用户可以在轨迹显示中包含计算网格；控制轨迹线型（包括缎带型线的扭曲度）；依据流场不同的标量值对型线着色并控制色彩深度；既可以选择显示节点值，也可以显示控制体单元值。若用户选择的是动态显示轨道，那么，可以控制动态模式。最后，可以生成颗粒轨迹的二维函数图并存储函数数据，此函数的 x 轴可以是时间或轨迹路径长度，而 y 轴可以是颗粒停留时间等。

这些选项与流线显示选项的控制方法完全相同。关于如何设定上述的各种选项，请参阅 25.14。

需要注意的是，除了用连续相的变量值来着色颗粒轨迹外，也可以使用离散相的各种变量值来进行着色。这些变量值包括：颗粒（已停留）时间、颗粒速度、颗粒直径、颗粒密度、颗粒质量、颗粒温度、颗粒所使用的定律、颗粒（积分）时间步长、颗粒雷诺数。在 **Color By** 类目框下的 **Particle Variables...** 下拉框中列出了所有可选的着色颗粒变量。为了显示计算域内的最大/最小值，可以点击 **Update Min/Max** 按钮更新。

轴对称模型的图形显示

对于轴对称问题，若颗粒的圆周速度非零，颗粒将会绕着模型的旋转中心线运动。FLUENT 显示颗粒轨迹在轴对称平面内的径向与轴向投影。

19.13.2 轨道结局的输出

当通过显示颗粒轨迹来进行轨道计算时，FLUENT 在此计算完成时，输出轨道的信息。缺省情况下，输出不同轨迹结局（逃逸、异常、蒸发等）的颗粒数：

```
DPM Iteration ....
number tracked = 7, escaped = 4, aborted = 0, trapped = 0, evaporated = 3, inco
Done.
```

在面板底部点击 **Track** 按钮，可以仅输出轨迹结局以跟踪颗粒而不必显示颗粒轨迹。

轨迹结局

颗粒的可能的结局如下：

- ``Escaped"逃逸意味着颗粒在已经设定了逃逸边界条件的流动边界终止了轨迹的计算。
- ``Incomplete"为完成意味着颗粒轨迹的计算时间步长已经达到设定的最大步数（在 **Discrete Phase Model** panel 面板中的 **Max. Number Of Steps** 文本框中设定，请参阅 19.12.1）。
- ``Trapped"逃逸意味着颗粒在已经设定了捕集边界条件的流动边界终止了轨迹的计算。
- ``Evaporated" 蒸发意味着颗粒在计算域中被完全蒸发掉了。
- ``Aborted"意味着颗粒由于舍入误差原因而不能进行计算。用户可以修改长度标尺或设定不同的初始条件来重新计算颗粒轨迹。

总结输出

当颗粒离开计算域时，用户可能会需要得到其他的轨迹细节信息。他们包括通过每个边界区的质量流率；蒸发颗粒的质量流率；颗粒组成。

1. 按 19.13.1 节所述步骤 1、2 显示颗粒轨迹。
2. 在 **Report Type** 下选择 **Summary**，然后点击 **Display** 或 **Track** 按钮。

如下所示的详细的颗粒信息就会在控制台窗口输出。此项信息可以输出到文件：在 **Report to** 单选框中选择 **File**，然后点击 **Write...**按钮（未作上述选择时为 **Display** 按钮），在弹出的 **Select File** dialog box 对话框中输入文件名就可以了。

```
DPM Iteration ....

number tracked = 10, escaped = 8, aborted = 0, trapped = 0, evaporated = 0, inc

 Fate                    Number          Elapsed Time (s)
                                      Min         Max         Avg     Std Dev
 ----                    ------  ---------- ---------- ---------- ---------- ---
 Incomplete                   2   1.485e+01  2.410e+01  1.947e+01  4.623e+00
 Escaped - Zone 7             8   4.940e+00  2.196e+01  1.226e+01  4.871e+00

                     (*)- Mass Transfer Summary -(*)

 Fate                         Mass Flow (kg/s)
                            Initial      Final     Change
 ----                    ---------- ---------- ----------
 Incomplete               1.388e-03  1.943e-04 -1.194e-03
 Escaped - Zone 7         1.502e-03  2.481e-04 -1.254e-03

                     (*)- Energy Transfer Summary -(*)

 Fate                         Heat Content (W)
                            Initial      Final     Change
 ----                    ---------- ---------- ----------
 Incomplete               4.051e+02  3.088e+02 -9.630e+01
 Escaped - Zone 7         4.383e+02  3.914e+02 -4.696e+01

                     (*)- Combusting Particles -(*)

 Fate                      Volatile Content (kg/s)       Char Content (kg/s)
                            Initial      Final   %Conv    Initial      Final
 ----                    ---------- ---------- -------  ---------- ---------- --
 Incomplete               6.247e-04  0.000e+00  100.00   5.691e-04  0.000e+00  1
 Escaped - Zone 7         6.758e-04  0.000e+00  100.00   6.158e-04  3.782e-05

Done.
```

输出内容包括每一种可能的颗粒轨迹结局以及具有这种结局的颗粒数目；颗粒的停留时间；质量与能量交换总量。这些内容对得到诸如何处颗粒重计算域中逃逸、何处颗粒与某个面发生碰撞以及颗粒在计算域中的传热量、传质量的大小等信息非常有帮助。对于燃烧颗粒，另有一些信息会输出。

停留时间

每种结局对应的颗粒数目列在 Number 目录下（从不同区逃逸或被捕集的颗粒视为具有不同的轨迹结局，因此被分别列出）。在 Min, Max, Avg, 和 Std Dev 下分别列出颗粒的最短停留时间、最大停留时间、平均停留时间以及停留时间的标准差。这些信息揭示出颗粒在逃逸、异常、蒸发或被捕集之前，在计算域中所停留的时间。

Fate	Number	Elapsed Time (s) Min	Max	Avg	Std Dev
----	------	----------	----------	----------	---------- ---
Incomplete	2	1.485e+01	2.410e+01	1.947e+01	4.623e+00
Escaped - Zone 7	8	4.940e+00	2.196e+01	1.226e+01	4.871e+00

另外，在输出项的右列是喷射源名称以及最短与最长停留时间颗粒的对应标识号（用户可能需要拉动滚动条才能看到此项）。

Elapsed Time (s) Min	Max	Avg	Std Dev	Injection, Index Min		Max	
---	----------	----------	----------	--------------------		--------------------	
+01	2.410e+01	1.947e+01	4.623e+00	injection-0	1	injection-0	0
+00	2.196e+01	1.226e+01	4.871e+00	injection-0	9	injection-0	2

质量转移总结输出

对于液滴或燃烧颗粒的颗粒结局，在 Initial, Final, and Change 列中分别列出了初始质量流率、最终质量流率（即颗粒轨迹尽头所对应的质量流率）、以及质量流率变化。利用这些信息用户可以确定有多少物质从颗粒转移到连续相中去。

(*)- Mass Transfer Summary -(*)

Fate	Mass Flow (kg/s) Initial	Final	Change
----	----------	----------	----------
Incomplete	1.388e-03	1.943e-04	-1.194e-03
Escaped - Zone 7	1.502e-03	2.481e-04	-1.254e-03

能量转移量输出

对于所有颗粒的颗粒结局，在 Initial, Final, and Change 列中分别列出了初始热流率、最终热流率（即颗粒轨迹尽头所对应的热流率）、以及热流率变化。利用这些信息用户可以确定有多少热量从连续相中转移到颗粒。

(*)- Energy Transfer Summary -(*)

Fate	Heat Content (W) Initial	Final	Change
----	----------	----------	----------
Incomplete	4.051e+02	3.088e+02	-9.630e+01
Escaped - Zone 7	4.383e+02	3.914e+02	-4.696e+01

燃烧颗粒

若计算颗粒为燃烧类型颗粒，FLUENT 的输出信息包括挥发份以及焦炭的转化量。这些信息可以帮助用户来辨识颗粒离开计算域时，其成分组成。

(*)- Combusting Particles -(*)

Fate	Volatile Content (kg/s) Initial	Final	%Conv	Char Content (kg/s) Initial	Final	%Conv
----	----------	----------	-------	----------	----------	-------
Incomplete	6.247e-04	0.000e+00	100.00	5.691e-04	0.000e+00	100.00
Escaped - Zone 7	6.758e-04	0.000e+00	100.00	6.158e-04	3.782e-05	93.86

在 Volatile Content 标题下的 Initial 和 Final 列中，分别列出了颗粒轨迹的初始与最终的挥发份含量。%Conv 行列出了已经析出物质的百分比。

在 Char Content 标题下的 Initial 和 Final 列中，分别列出了颗粒轨迹的初始与最终可反应成分的质量流率。%Conv 行下列出了已经反应的焦炭的百分比。

19.13.3 轨道的逐步输出

有时，用户可能希望获得详细的、逐步的颗粒轨迹输出。可以通过文本方式得到此项输出。此项功能使得用户可以查看颗粒沿程位置、速度、温度以及直径。

轨道的逐步输出（到文件）设定的步骤如下：

1. 按 19.3.1 节所述方法的步骤 1、2 显示颗粒轨道。当用户 **Track Single Particle Stream** 激活选项时，可以一次跟踪单个颗粒。
2. 在 **Report Type** 中激活 **Step By Step** 选项。
3. 在 **Report to** 选项中激活 **File** 选项（**Display** 按钮将变成 **Write...**按钮）。
4. 在 **Significant Figures** 文本框中输入轨迹逐步输出中的有效数字位数。
5. 点击 **Write...**按钮，在弹出的 **Select File** dialog box.文件选择对话框中输入文件名。

在轨迹被显示出来之前，以下面的例子类似的输出项将会被存储在用户所的设定的特定文件中（用户也可以在 **Report to** 选项中激活 **Console** 选项，然后点击 **Display** 或 **Track** 按钮将述出结果打印在控制台窗口，但是，输出内容过于繁长，所以用户根本无法利用此种输出格式）。

逐步输出的颗粒信息列表显示出颗粒沿程某些特定时刻的位置、速度：

```
Time        X-Position  Y-Position  Z-Velocity  X-Velocity  Y-Velocity  Z-Veloc
 0.000e+00   1.411e-03   3.200e-03   0.000e+00   2.650e+01   0.000e+00   0.000e
 3.773e-05   2.411e-03   3.200e-03   0.000e+00   2.648e+01   0.000e+00   0.000e
 5.403e-05   2.822e-03   3.192e-03   0.000e+00   2.647e+01   0.000e+00   0.000e
 9.181e-05   3.822e-03   3.192e-03   0.000e+00   2.644e+01   0.000e+00   0.000e
 1.296e-04   4.821e-03   3.192e-03   0.000e+00   2.642e+01   0.000e+00   0.000e
 1.608e-04   5.644e-03   3.192e-03   0.000e+00   2.639e+01   0.000e+00   0.000e
    .           .           .           .           .           .           .
    .           .           .           .           .           .           .
    .           .           .           .           .           .           .
```

同样也列出了颗粒的直径、温度、密度以及颗粒质量（用户可能需要拉动滚动条才能看到这些内容）。

```
elocity  Y-Velocity  Z-Velocity  Diameter   Temperature  Density    Mass
650e+01   0.000e+00   0.000e+00   2.000e-04   3.000e+02   1.300e+03   5.445e-09
648e+01   0.000e+00   0.000e+00   2.000e-04   3.006e+02   1.300e+03   5.445e-09
647e+01   0.000e+00   0.000e+00   2.000e-04   3.009e+02   1.300e+03   5.445e-09
644e+01   0.000e+00   0.000e+00   2.000e-04   3.015e+02   1.300e+03   5.445e-09
642e+01   0.000e+00   0.000e+00   2.000e-04   3.022e+02   1.300e+03   5.445e-09
639e+01   0.000e+00   0.000e+00   2.000e-04   3.027e+02   1.300e+03   5.445e-09
 .          .           .           .           .           .           .
 .          .           .           .           .           .           .
 .          .           .           .           .           .          .9.
```

19.13.4 非稳态跟踪中的当前颗粒位置输出

当使用非稳态颗粒跟踪模型时，用户可能希望知道颗粒的轨迹从而知悉颗粒当前位置。在 **ParticleTracks** panel 面板中的 **Report Type** 选项中激活 **Current Positions** 选项就可以显示出

颗粒的当前位置。

生成包含颗粒当前位置信息的颗粒轨迹文件的设定步骤如下：

1. 按 19.3.1 节所述方法的步骤 1、2 显示颗粒轨道。当用户 Track Single Particle Stream 激活选项时，可以一次跟踪单个颗粒。
2. 在 Report Type 选项中选定 Current Position 选项。
3. 在 Report to 选项中选定 File 项（Display 按钮将变成 Write...按钮）。
4. 在 Significant Figures 文本框中输入轨迹逐步输出中的有效数字位数。
5. 点击 Write...按钮，在弹出的 Select File dialog box.文件选择对话框中输入文件名。

列表包含了所有存在于计算域中的颗粒当前位置、速度：

```
Time        X-Position  Y-Position  Z-Position  X-Velocity  Y-Velocity  Z-Veloc
 0.000e+00   1.000e-03   3.120e-02   0.000e+00   1.000e+01   5.000e+00   0.000e
 1.672e-05   1.168e-03   3.128e-02   0.000e+00   1.010e+01   4.988e+00   0.000e
 3.342e-05   1.337e-03   3.137e-02   0.000e+00   1.019e+01   4.977e+00   0.000e
 5.010e-05   1.508e-03   3.145e-02   0.000e+00   1.028e+01   4.965e+00   0.000e
 6.675e-05   1.680e-03   3.153e-02   0.000e+00   1.038e+01   4.954e+00   0.000e
 8.338e-05   1.854e-03   3.161e-02   0.000e+00   1.047e+01   4.942e+00   0.000e
     .           .           .           .           .           .           .
     .           .           .           .           .           .           .
     .           .           .           .           .           .           .
```

同样也列出了颗粒的直径、温度、密度以及颗粒质量（用户可能需要拉动滚动条才能看到这些内容）。

```
elocity   Y-Velocity  Z-Velocity  Diameter   Temperature  Density    Mass
000e+01    5.000e+00   0.000e+00   7.000e-05  3.000e+02    1.300e+03  2.335e-10
010e+01    4.988e+00   0.000e+00   7.000e-05  3.009e+02    1.300e+03  2.335e-10
019e+01    4.977e+00   0.000e+00   7.000e-05  3.019e+02    1.300e+03  2.335e-10
028e+01    4.965e+00   0.000e+00   7.000e-05  3.028e+02    1.300e+03  2.335e-10
038e+01    4.954e+00   0.000e+00   7.000e-05  3.037e+02    1.300e+03  2.335e-10
047e+01    4.942e+00   0.000e+00   7.000e-05  3.046e+02    1.300e+03  2.335e-10
     .           .           .           .           .           .           .
     .           .           .           .           .           .           .
     .           .           .           .           .           .           .
```

19.13.5 相间交换项以及离散相浓度的输出

FLUENT 可以输出每个计算流体单元中的相间动量、热量以及质量交换量。同样也可以输出离散相的浓度值。用户可以用图形方式显示这些变量的等高线图或锋面图等。这些变量均包含在后处理面板中 Discrete Phase Model...目录下的变量选择下拉菜单中：

- DPM Concentration 颗粒浓度
- DPM Mass Source 颗粒质量交换源项
- DPM X,Y,Z Momentum Source 颗粒坐标轴方向的动量交换源项
- DPM Swirl Momentum Source 颗粒角动量交换源项
- DPM Sensible Enthalpy Source 颗粒显焓[4]交换源项
- DPM Enthalpy Source 颗粒总焓交换源项
- DPM Absorption Coefficient 颗粒辐射吸收系数

[4] 显焓定义：$h = \sum_j Y_j h_j$

- DPM Emission 颗粒辐射发射率（黑度）
- DPM Scattering 颗粒辐射散射率
- DPM Burnout 颗粒燃尽率
- DPM Evaporation/Devolatilization 颗粒蒸发/析出量
- DPM (species) Source 颗粒组分源项
- DPM Erosion 颗粒磨蚀率
- DPM Accretion 颗粒沉积率

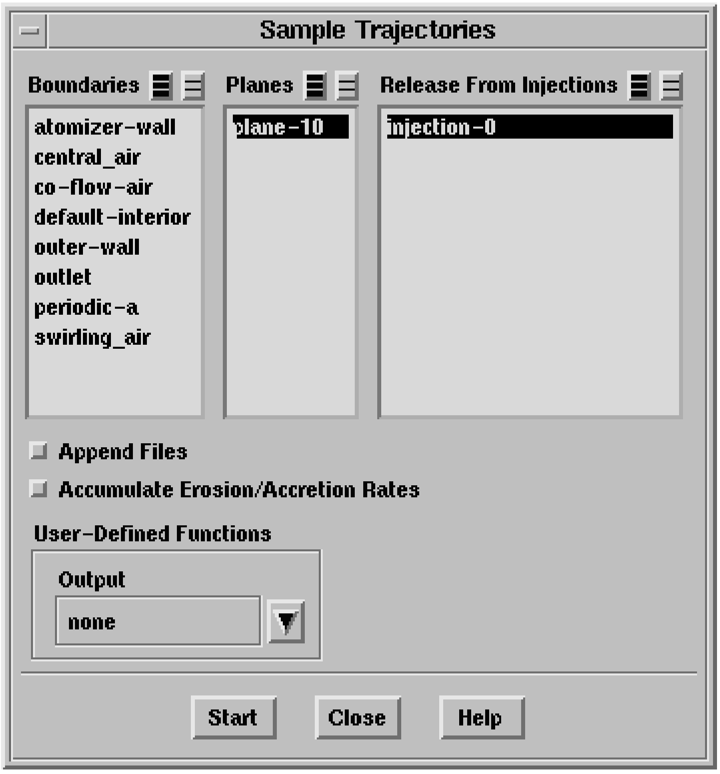
关于上述变量的定义请参阅第 27 章。

需要注意的是只有在执行相间耦合计算时，上述的各种相间交换项才会被更新与显示。颗粒轨迹信息的输出与显示（请参阅 19.13.1 和 19.13.2）不会改变各种交换项的数值。

19.13.6 轨道的采样

使用 **Sample Trajectories** panel 面板（图 19.13.2）可以获得在指定的各种边界、平面（二维情况为线段）颗粒状态（颗粒位置、速度、直径、温度以及质量流率）输出文件。

Report →Discrete Phase →Sample...



图表 19.13.2 轨道采样面板

生成包含颗粒采样信息文件设定步骤如下：

1. 在列表框中选择准备跟踪的颗粒喷射源。
2. 选择准备进行采样的表面。表面既可以是 **Boundaries** 列表中的各种边界，也可以是 **Planes**（三维）列表中的平面或 **Lines**（二维）列表中的线段。
3. 点击按钮。需要注意的是对于非稳态颗粒跟踪，**Compute** 按钮将变成 **Start** 按钮（开始采样）或者是 **Stop** 按钮（结束采样）。

点击 **Compute** 按钮之后将会触发颗粒跟踪迹计算的开始，当颗粒与选定平面相交时，其当前状态就被记录到文件中。文件名为选定的平面名加上后缀.dpm。

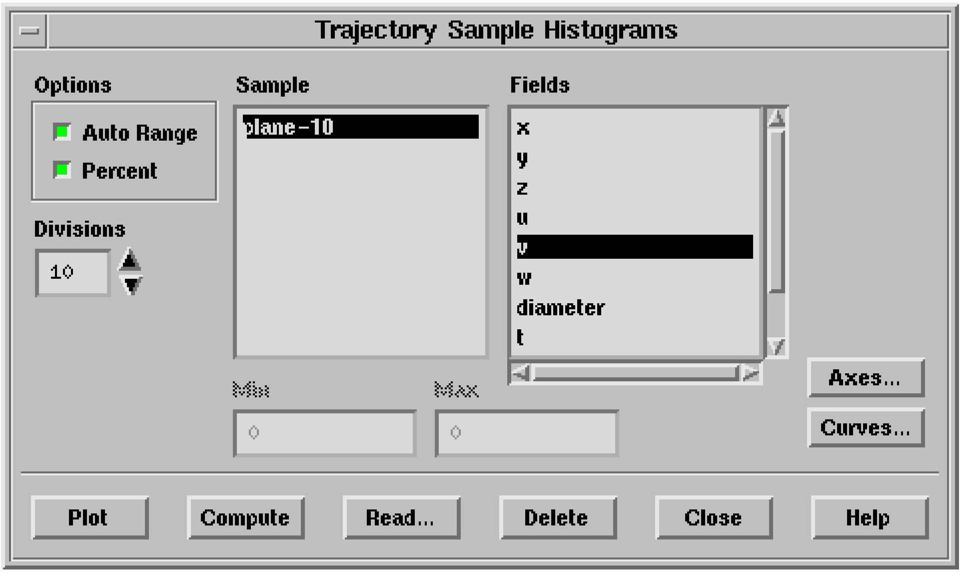
对于非稳态颗粒跟踪，点击 Start 按钮将打开文件并写入头部文件信息。若计算一定时间步数之后，获得了一个解，颗粒轨道将会更新并且，当颗粒轨迹与选定平面相交时，颗粒的当时状态会被记录在文件之中。点击 Stop 按钮将关闭文件并且结束了轨迹采样。

对于随机跟踪模型，多次重复上述过程并且把结果续写到同一个文件中，从而可以检测每次轨迹更新的统计平均值。为此，在重复计算之前（点击 Compute 按钮）激活 Append Files 选项。同理，激活 Accumulate Erosion/Accretion Rates 选项之后，就可以通过重复的轨道计算来考察壁面的磨蚀以及沉积速率（请参阅 19.13.8）。采样数据的输出格式及内容可以通过用户定义函数来控制（在 Output 下拉框中选择）。关于用户定义函数请参阅单独的用户定义函数手册。

19.13.7 采样数据的直方图

使用 Trajectory Sample Histograms panel 面板（图 19.13.3）中的 Sample Trajectories panel 选项创建的颗粒采样数据（请参阅 19.13.6）可以绘制直方图。

Report → Discrete Phase → Histogram...



图表 30 颗粒轨迹采样直方图

从采样数据绘制直方图的设定过程如下：

1. 点击 Read...按钮，然后选择想要读取的文件。读入文件数据之后，相应的边界名称将会出现在 Sample 列表里。
2. 在 Sample 列表中选择采样数据（面），然后在 Fields 列表中选择准备绘制直方图的数据。
3. 在此面板底部点击 Plot 按钮以显示直方图。

缺省情况下，*y* 轴表示的是颗粒百分数。在 Options 属性框下取消 Percent 选项就可以显示实际颗粒数。在 Divisions 选项下可以设定图形中的间隔数（组数）。使用 Delete 按钮可以从列表中删除采样平面，点击 Compute 按钮可更新 Min/Max 值。

19.13.8 磨蚀/沉积的后处理

用户可以使用 Sample Trajectories 面板以积聚方式（通过一系列的喷射源）来计算壁面的磨蚀/沉积速率。首先在 Release From Injections 列表中选定某个喷射源然后计算其轨道；然后激活 Accumulate Erosion/Accretion Rates 选项，选定下一个喷射源（在取消第一个喷射源之后），点击 Compute 按钮。每次用户点击 Compute 之后，此表面的速率就会积聚。

!! 由于磨蚀速率沉积速率仅定义在壁面，所以他们不能以节点数值显示。

参考文献

索引号	作者	文献标题	出版刊物名称	所在章节	出现顺序	文献查询地点	备注
135	A. Li and G. Ahmadi.	Dispersion and Deposition of Spherical Particles from Point Sources in a Turbulent Channel Flow	Aerosol Science and Technology, 16:209-226, 1992.	19.2 节	6	清华大学图书馆	V.16-17: 92.01-92.11 馆内阅览
141	R. J. Litchford and S.M. Jeng.	Efficient Statistical Transport Model for Turbulent Particle Dispersion in Sprays	AIAA Journal, 29:1443, 1991	19.2 节	11	清华大学图书馆	v.1- 1963-
236	W. Tabakoff and T. Wakeman	Measured particle rebound characteristics useful for erosion prediction	ASME paper 82-GT-170, 1982.	19.10 节	54		
188	R. D. Reitz	Mechanisms of Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays	Atomization and Spray Technology, 3:309-337, 1987.	19.4 节	50		
270	P.-K. Wu, L.-K. Tseng, and G. M. Faeth	Primary Breakup in Gas/Liquid Mixing Layers for Turbulent Liquids.	Atomization and Sprays, 2:295-317, 1995	19.4 节	38		
86	Z. Han, S. Perrish, P. V. Farrell, and R. D. Reitz	Modeling Atomization Processes of Pressure-Swirl Hollow-Cone Fuel Sprays	Atomization and Sprays, 7(6):663-684, Nov.-Dec. 1997	19.4 节	41		
204	D. P. Schmidt and M. L. Corradini.	Analytical Prediction of the Exit Flow of Cavitating Orifices	Atomization and Sprays, 7:6, 1997	19.4 节	35		
229	H. B. Squire.	Investigation of the Instability of a Moving Liquid Film	British Journal of Applied Physics, 4:167, 1953	19.4 节	43	中科科院图书馆)	v.1-18 1950-67 Ser.2: v.1-2 1968-69
184	W. E. Ranz.	Some Experiments on Orifice Sprays	Canadian Journal of Chemical Engineering, page	19.4 节	36		

			175, 1958					
185	W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr.	Evaporation from Drops, Part I.	Chem. Eng. Prog., 48(3):141-146, March 1952	19.3 节	15			
186	W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr.	Evaporation from Drops, Part II	Chem. Eng. Prog., 48(4):173-180, April 1952	19.3 节	16			
216	I. W. Smith.		Comb. Flame, 17:421, 1971.	19.3 节	30			v.16-30 1971-77
65	M. A. Field	Rate of Combustion Of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K.	Combust. Flame, 13:237-252, 1969.	19.3 节	26			v.1-13 1957-69 v.16-30 1971-77
13	M. M. Baum and P. J. Street	Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles.	Combust. Sci. Tech., 3(5):231-243, 1971.	19.3 节	19			中科院文 v.2-56 1970-87
15	L. L. Baxter and P. J. Smith	Turbulent Dispersion of Particles: The STP Model	Energy & Fuels, 7:852-859, 1993	19.2 节	9			石油化工科学研究院图书馆 v.3- 1989-
69	T. H. Fletcher, A. R. Kerstein, R. J. Pugmire, and D. M. Grant.	Chemical percolation model for devolatilization: 2. Temperature and heating rate effects on product yields.	Energy and Fuels, 4:54, 1990	19.3 节	24			石油化工科学研究院图书馆 v.3- 1989-
68	T. H. Fletcher and A. R. Kerstein	Chemical percolation model for devolatilization: 3. Direct use of 13C NMR data to predict effects of coal type.	Energy and Fuels, 6:414, 1992	19.3 节	23			石油化工科学研究院图书馆 v.3- 1989-
217	I. W. Smith.	The Intrinsic Reactivity of Carbons to Oxygen.	Fuel, 57:409-414, 1978.	19.3 节	29			清华大学图书馆 v.38- 1959-
132	A. H. Lefebvre.	Atomization and Sprays	Hemisphere Publishing Corporation, 1989	19.4 节	39		清华大学图书馆	
117	H. Kobayashi, J. B. Howard,	Coal Devolatilization at High Temperatures	In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The	19.3 节	22		国家图书馆	16th/(1976) 外文闭架借 外文图书子库

	and A. F. Sarofim.		Combustion Institute, 1976.				外文基藏 8 层南 2/TQ038.1-2/SIC 0 3058139779
218	I. W. Smith.	The Combustion Rates of Coal Chars: A Review	In 19th Symp. (Int'l.) on Combustion, pages 1045-1065. The Combustion Institute, 1982	19.3 节	27	新馆大厅出纳台	O643.2 FS98 1982
24	R. K. Boyd and J. H. Kent	Three-dimensional furnace computer modeling	In 21st Symp. (Int'l.) on Combustion, pages 265-274. The Combustion Institute, 1986.	19.3 节	31		
205	D. P. Schmidt, M. L. Corradini, and C. J. Rutland	A Two-Dimensional, Non-Equilibrium Model of Flashing Nozzle Flow.	In 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 1999.	19.4 节	47		
60	J. K. Edwards, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi	Evaluation of Alternative Pipe Bend Fittings in Erosive Service.	In Proceedings of ASME FEDSM'00: ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Boston, June 2000	19.2 节	14		
5	S. Badzioch and P. G. W. Hawksley	Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles.	Ind. Eng. Chem. Process Design and Development, 9:521-530, 1970.	19.3 节	21		
207	P. K. Senecal, D. P. Schmidt, I. Nouar, C. J. Rutland, and R. D. Reitz.	Modeling High Speed Viscous Liquid Sheet Atomization	International Journal of Multiphase Flow, in press.	19.4 节	42		
237	L. Talbot et al.	Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer.	J. Fluid Mech., 101(4):737-758, 1980.	19.2 节	5		清华大学图书馆 v.1- 1956-
196	P. G.	The Lift on a Small	J. Fluid Mech.,	19.2	7		

	Saffman.	Sphere in a Slow Shear Flow	22:385-400, 1965	节			
163	S. A. Morsi and A. J. Alexander	An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems	J. Fluid Mech., 55(2):193-208, September 26 1972.	19.2 节	1		
180	K. K. Pillai	The Influence of Coal Type on Devolatilization and Combustion in Fluidized Beds	J. Inst. Energy, page 142, 1981.	19.3 节	20	清华大学图书馆	v.54- 1981-
120	K. K. Y. Kuo.	Principles of Combustion	John Wiley and Sons, New York, 1986	19.3 节	18		
84	W. W. Hagerty and J. F. Shea.	A Study of the Stability of Plane Fluid Sheets	Journal of Applied Mechanics, 22:509, 1955.	19.4 节	44		清华大学图书馆 v.2-25 1935-58 v.45-
170	H. Ounis, G. Ahmadi, and J. B. McLaughlin.	Brownian Diffusion of Submicrometer Particles in the Viscous Sublayer	Journal of Colloid and Interface Science, 143(1):266-277, 1991	19.2 节	3		清华大学 v.21- 1966-
136	X. Li and R. S. Tankin.	On the Temporal Instability of a Two-Dimensional Viscous Liquid Sheet	Journal of Fluid Mechanics, 226:425, 1991.	19.4 节	45		清华大学图书馆 v.1- 1956-
166	W. H. Nurick.	Orifice Cavitation and Its Effects on Spray Mixing.	Journal of Fluids Engineering, page 98, 1976.	19.4 节	33		哈尔滨工业大学图书馆 v.81-118 1959-96 (缺 v.84,no.1; v.108,no.3)
137	A. K. Lichtarowicz, R. K. Duggins, and E. Markland.	Discharge Coefficients for Incompressible Non-Cavitating Flow Through Long Orifices	Journal of Mechanical Engineering Science, 7:2, 1965.	19.4 节	34		
175	R. H. Perry, D. W. Gree, and J. O. Maloney	Perry's Chemical Engineers' Handbook	McGraw Hill, New York, 6th edition, 1984	19.3 节	17		
14	L. L. Baxter.	Turbulent Transport	PhD thesis,	19.2	8		

		of Particles.	Brigham Young University, Provo, Utah, 1989	节			
99	S. Jain	Three-Dimensional Simulation of Turbulent Particle Dispersion	PhD thesis, University of Utah, Utah, 1995	19.2 节	10		
254	L. P. Wang.	On the Dispersion of Heavy Particles by Turbulent Motion.	PhD thesis, Washington State University, 1990.	19.2 节	13		
48	B. J. Daly and F. H. Harlow	Transport Equations in Turbulence	Phys. Fluids, 13:2634-2649, 1970.	19.2 节	12		
189	R. D. Reitz and F. V. Bracco.	Mechanism of Atomization of a Liquid Jet.	Phys. Fluids., 26(10), 1982.	19.4 节	37		
85	A. Haider and O. Levenspiel	Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles	Powder Technology, 58:63-70, 1989.	19.2 节	2		
130	N. M. Laurendeau	Heterogeneous Kinetics of Coal Char Gasification and Combustion	Prog. Energy Comb. Sci., 4:221-270, 1978	19.3 节	28		
118	S. C. Kong, Z. Han, and R. D. Reitz	The Development and Application of a Diesel Ignition and Combustion Model for Multidimensional Engine Simulation.	SAE 872089, SAE, 1995. www.sae.org Society of Automotive Engineers (SAE)	19.4 节	52		
206	D. P. Schmidt, I. Nouar, P. K. Senecal, C. J. Rutland, J. K. Martin, and R. D. Reitz.	Pressure-Swirl Atomization in the Near Field	SAE Paper 01-0496, SAE, 1999	19.4 节	40		
225	C. Soteriou, R. Andrews, and M. Smith	Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization.	SAE Paper 950080, SAE, 1995.	19.4 节	32		
8	H. Barths, C.	Three-Dimensional	SAE Paper,	19.3	25		

	Antoni, and N. Peters	Simulation of Pollutant Formation in a DI-Diesel Engine Using Multiple Interactive Flamelets.	accepted for publication 1998	节			
169	P.J. O'Rourke and A. A. Amsden	The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup	SAE Technical Paper 872089, SAE, 1987.	19.4 节	49		
142	A. B. Liu, D. Mather, and R. D. Reitz	Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays.	SAE Technical Paper 930072, SAE, 1993	19.4 节	53		
38	Clift, Grace, and Weber.	Bubbles, Drops, and Particles	Technical report, Academic Press, 1978.	19.2 节	4		
239	G. I. Taylor.	The Shape and Acceleration of a Drop in a High Speed Air Stream	Technical report, In the Scientific Papers of G. I. Taylor, ed., G. K. Batchelor, 1963	19.4 节	48		
187	R. D. Reitz	Mechanisms of Breakup of Round Liquid Jets.	The Encyclopedia of Fluid Mechanics, ed. N. Cheremisnoff, 3:223-249, 1986.	19.4 节	51		
257	C. Weber	Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles	ZAMM, 11:136-154, 1931	19.4 节	46		

20.通用多相流模型（General Multiphase Models）

本章讨论了在 FLUENT 中可用的通用的多相流模型。第 18 章提供了多相流模型的简要介绍。第 19 章讨论了 Lagrangian 离散相模型，第 21 章讲述了 FLUENT 中的凝固和熔化模型。

20.1 选择通用多相流模型（Choosing a General Multiphase Model）
20.2VOF 模型(Volume of Fluid(VOF)Model)
20.3 混合模型(Mixture Model)
20.4 欧拉模型(Eulerian Model)
20.5 气穴影响(Cavity Effects)
20.6 设置通用多相流问题(Setting Up a General Multiphase Problem)
20.7 通用多相流问题求解策略(Solution Strategies for General Multiphase Problems)
20.8 通用多相流问题后处理(Postprocessing for General Multiphase Problems)

20.1 选择通用的多相流模型（Choosing a General Multiphase Model）

正如在 Section 18.4 中讨论过的，VOF 模型适合于分层的或自由表面流，而 mixture 和 Eulerian 模型适合于流动中有相混合或分离，或者分散相的 volume fraction 超过 10%的情形。（流动中分散相的 volume fraction 小于或等于 10%时可使用第 19 章讨论过的离散相模型）。

为了在 mixture 模型和 Eulerian 模型之间作出选择，除了 Section18.4 中详细的指导外，你还应考虑以下几点：

- ★ 如果分散相有着宽广的分布，mixture 模型是最可取的。如果分散相只集中在区域的一部分，你应当使用 Eulerian 模型。
- ★ 如果应用于你的系统的相间曳力规律是可利用的（either within **FLUENT** or through a user-defined function），Eulerian 模型通常比 mixture 模型能给出更精确的结果。如果相间的曳力规律不知道或者它们应用于你的系统是有疑问的，mixture 模型可能是更好的选择。
- ★ 如果你想解一个需要计算付出较少的简单的问题，mixture 模型可能是更好的选择，因为它比 Eulerian 模型要少解一部分方程。如果精度比计算付出更重要，Eulerian 模型是更好的选择。但是请记住，复杂的 Eulerian 模型比 mixture 模型的计算稳定性要差。

三种模型概要的讲述，包括它们各自的局限，在 Sections20.1.1，20.1.2，20.1.3 中给出。

三种模型详细的讲述在 Sections20.2,20.3 和 20.4 中给出。

20.1.1VOF 模型的概述及局限(Overview and Limitations of the VOF Model)

概述（Overview）

VOF 模型通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的 volume fraction 来模拟两种或三种不能混合的流体。典型的应用包括预测，
jet breakup、流体中大泡的运动（the motion of large bubbles in a liquid）、the motion of liquid after a dam break 和气液界面的稳态和瞬态处理（the steady or transient tracking of any liquid-gas interface）。

局限（limitations）

下面的一些限制应用于 FLUENT 中的 VOF 模型：

- ★ 你必须使用 segregated solver. VOF 模型不能用于 coupled solvers.
- ★ 所有的控制容积必须充满单一流体相或者相的联合；VOF 模型不允许在那些空的区域中没有任何类型的流体存在。
- ★ 只有一相是可压缩的。

★ Streamwise periodic flow (either specified mass flow rate or specified pressure drop) cannot be modeled when the VOF model is used.

★ Species mixing and reacting flow cannot be modeled when the VOF model is used.

★ 大涡模拟紊流模型不能用于 VOF 模型。

★ 二阶隐式的 time-stepping 公式不能用于 VOF 模型。

★ VOF 模型不能用于无粘流。

★ The shell conduction model for walls cannot be used with the VOF model.

稳态和瞬态的 VOF 计算

在 FLUENT 中 VOF 公式通常用于计算时间依赖解，但是对于只关心稳态解的问题，它也可以执行稳态计算。稳态 VOF 计算是敏感的只有当你的解是独立于初始时间并且对于单相有明显的流入边界。例如，由于在旋转的杯子中自由表面的形状依赖于流体的出事水平，这样的问题必须使用 time-dependent 公式。另一方面，渠道内顶部有空气的水的流动和分离的空气入口可以采用 steady-state 公式求解。

20.1.2Mixture 模型的概述和局限(Overview and Limitations of the Mixture Model)

概述

混合模型是一种简化的多相流模型，它用于模拟各相有不同速度的多相流，但是假定了在短空间尺度上局部的平衡。相之间的耦合应当是很强的。它也用于模拟有强烈耦合的各向同性多相流和各相以相同速度运动的多相流。

混合模型可以模拟 n 相（fluid or particulate）通过求解混合相的动量、连续性和能量方程，第二相的 volume fraction 方程，以及相对速度的代数表示。典型的应用包括沉降（sedimentation），旋风分离器（cyclone separators），particle-laden flow with low loading,以及气相容积率很低的泡状流。

混合模型是 Eulerian 模型在几种情形下的很好替代。 当存在大范围的颗粒相分布或者界面的规律未知或者它们的可靠性有疑问时，完善的多相流模型是不切实可行的。当求解变量的个数小于完善的多相流模型时，象混合模型这样简单的模型能和完善的多相流模型一样取得好的结果。

局限性（limitation）

下面的局限应用于混合模型在 FLUENT 中：

★ 你必须使用 segregated solver.混合模型不适合于任何 coupled solver.

★ 只有一相是可压缩的。

★ Streamwise periodic flow (either specified mass flow rate or specified pressure drop) cannot be modeled when the mixture model is used.

★ Species mixing and reacting flow cannot be modeled when the mixture model is used.

★ Solidification and melting cannot be modeled in conjunction with the mixture model.

★ 大涡紊流模型不能使用在混合模型中。

★ The second-order implicit time-stepping formulation cannot be used with the mixture model.

★ 混合模型不能用于无粘流。

★ The shell conduction model for walls cannot be used with the mixture model

20.1.3Eulerian 模型的概述和局限性（Overview and Limitation of the Eulerian Model）

概述（Overview）

在 FLUENT 中的可以模拟多相分离流，及相间的相互作用。相可以是液体、气体、固体的几乎是任意的联合。Eulerian 处理用于每一相，相比之下，Eulerian-Lagrangian 处理用于离散相模型。

采用 Eulerian 模型，第二相的数量仅仅因为内存要求和收敛行为而受到限制。只要有足够的内存，任何数量的第二相都可以模拟。然而，对于复杂的多相流流动，你会发现你的解由于收敛性而受到限制。见 Section 20.7.3 多相流模型的策略。

FLUENT 中的 Eulerian 多相流模型不同于 FLUENT4 中的 Eluerian 模型，在 FLUENT4 中液-液和液-固（granular）多相流动没有全局的差别。颗粒流是一种简单的流动，它涉及到至少有一相被指定为颗粒相。

FLUENT 解是基于以下的：

★ 单一的压力是被各相共享的。

★ 动量和连续性方程是对每一相求解。

★ 下面的参数对颗粒相是有效的：

（1） 颗粒温度（固体波动的能量）是对每一固体相计算的。这是基于代数关系的。

（2） 固体相的剪切和可视粘性是把分子运动论用于颗粒流而获得的。摩擦粘性也是有效的。

★ 几相间的曳力系数函数是有效的，它们适合于不同类型的多相流系。（你也可以通过用户定义函数修改相间的曳力系数，as described in the separate UDF Manual）。

★ 所有的 $\kappa-\varepsilon$ 紊流模型都是有效的，可以用于所有相或者混合相。

局限性（Limitations）

除了以下的限制外，在 FLUENT 中所有其他的可利用特性都可以在 Eulerian 多相流模型中使用：

★ 只有 $\kappa-\varepsilon$ 模型能用于紊流。

★ 颗粒跟踪（使用 Lagrangian 分散相模型）仅与主相相互作用。

★ Streamwise periodic flow (either specified mass flow rate or specified pressure drop) cannot be modeled when the Eulerian model is used.

★ 压缩流动是不允许的。

★ 无粘流是不允许的。

★ The second-order implicit time-stepping formulation cannot be used with the Eulerian model.

★ Species transport and reactions are not allowed.

★ Heat transfer cannot be modeled.

★ The only type of mass transfer between phases that is allowed is cavitation; evaporation, condensation, etc. are not allowed.

稳定性和收敛性（Stability and Convergence）

求解多相流系统的过程本来是困难的，你会遇到稳定性和收敛性的问题，尽管现在的算法比 FLUENT4 中用的更稳定了。如果要求解 time-dependent 问题，并且 patched fields 用于初始条件，建议你采用较小的时间步长迭代几步，至少要比流动的特性时间小一个数量级。在迭代几步后你可以增加时间步长的大小。对稳态问题建议你开始时为 volume fraction 用较小的欠松弛因子。

非混合流体的分层流动应采用 VOF 模型求解（see Section 20.2）。一些涉及到小 volume fractions 问题用 Lagrangian 离散相模型求解更有效（see Chapter 19）。如果在求解和设置过程中小心些，许多稳定性和收敛性的问题可以减到最小（see Section 20.7.3）

20.2VOF 模型（Volume of Fluid(OVF) Model）

VOF 公式依靠的是两种或多种流体（或相）没有互相穿插（interpenetrating）这一事实。对你增加到模型里的每一附加相，就引进一个变量：即计算单元里的相的容积比

率（the volume fraction of the phase）。在每个控制容积内，所有相的 volume fraction 的和为 1。所有变量及其属性的区域被各相共享并且代表了容积平均值（volume-averaged values）,只要每一相的容积比率在每一位置是可知的。这样，在任何给定单元内的变量及其属性或者纯粹代表了一相，或者代表了相的混合，这取决于容积比率值。换句话说，在单元中，如果第 q 相流体的容积比率记为α_q，那么下面的三个条件是可能的：

★$\alpha_q = 0$：第 q 相流体在单元中是空的。

★$\alpha_q = 1$：第 q 相流体在单元中是充满的。

★$0 < \alpha_q < 1$：单元中包含了第 q 相流体和一相或者其它多相流体的界面。

基于α_q的局部值，适当的属性和变量在一定范围内分配给每一控制容积。

20.2.1 容积比率方程（The Volume Fraction Equation）

跟踪相之间的界面是通过求解一相或多相的容积比率的连续方程来完成的。对第 q 相，这个方程如下：

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \qquad (20.2.1)$$

默认情形，方程 20.2.1 右端的源项为零，但除了你给每一相指定常数或用户定义的质量源。容积比率方程不是为主相求解的，主相容积比率的计算基于如下的约束：

$$\sum_{q=1}^{n} \alpha_q = 1 \qquad (20.2.2)$$

20.2.2 属性（Properties）

出现在输运方程中的属性是由存在于每一控制容积中的分相决定的。例如，在两相流系统中，如果相用下标 1 和 2 表示，如果第二相的容积比率被跟踪，那么每一单元中的密度由下式给出：$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2)\rho_1$ （20.2.3）

通常，对 n 相系统，容积比率平均密度采用如下形式：

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \qquad (20.2.4)$$

所有的其它属性(e.g.,viscosity)都以这种方式计算。

20.2.3 动量方程（The Momentum Equation）

通过求解整个区域内的单一的动量方程，作为结果的速度场是由各相共享的。如下所示，动量方程取决于通过属性ρ和μ的所有相的的容积比率。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^{T} \right) \right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \qquad (20.2.5)$$

近似共享区域的一个局限是这种情形时，各相之间存在大的速度差异，靠近界面的速度的精确计算被相反的影响。

20.2.4 能量方程（The Energy Equation）

能量方程，也就是在相中共享的，表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h$$ （20.2.6）

VOF 模型处理能量 E 和温度 T，作为质量平均变量：

$$E = \frac{\sum_{q=1}^{n} \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^{n} \alpha_q \rho_q}$$ （20.2.7）

这里对每一相的 E_q 是基于该相的比热和共享温度。

属性 ρ 和 k_{eff}（有效热传导）是被各相共享的。源项 S_h 包含辐射的贡献，也有其他容积热源。

和速度场一样，在相间存在大的温度差时，靠近界面的温度的精确度也受到限制。在属性有几个数量级的变化时，这样的问题也会增长。例如，如果一个模型包括液体金属和空气，材料的导热性有四个数量级的差异。如此大的差异会导致方程有各向异性的系数，这反回来导致收敛性和精度受限。

20.2.5 附加的标量方程（Additional Scalar Equations）

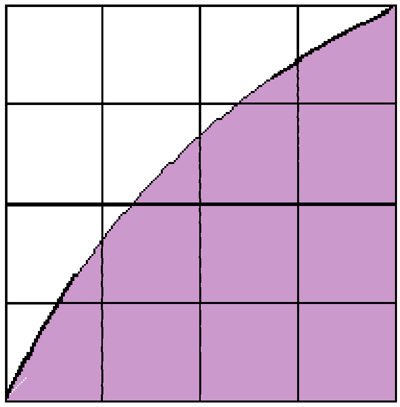
依赖于你的问题的定义，在求解时或许涉及到附加的标量方程。在紊流情形时，只求解一套输送方程，紊流变量（e.g., k *and* ε or Reynolds stresses）被通过整个区域的各相所共享。

20.2.6 界面附近的插值（Interpolation Near the Interface）

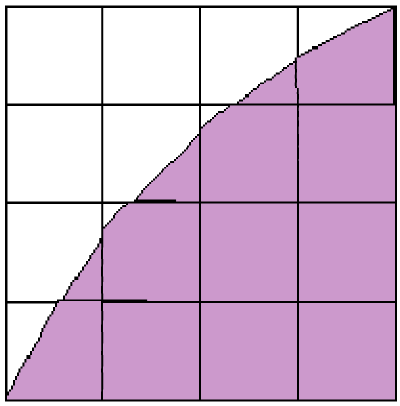
FLUENT 中的控制容积公式要求计算穿过控制容积面的对流和扩散通量并与控制容积本身内部的源项平衡。对 VOF 模型 FLUENT 中有四种方案计算面的通量：几何重建（geometric reconstruction），物质接受（donor-acceptor），欧拉显式和隐式。

在几何重建和物质接受方案中，FLUENT 用了特殊的插值处理两相之间界面附近的单元。图 20.2.1 显示了用这两种方法计算过程中沿着假定的界面的实际界面的形状。

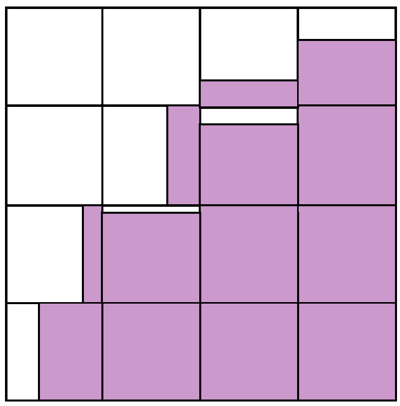
Figure 20.2.1: Interface Calculations



actual interface shape



interface shape represented by
the geometric reconstruction
(piecewise-linear) scheme



interface shape represented by
the donor-acceptor scheme

欧拉显式和隐式方案以相同的插值方式处理这些完全充满一相或其它相的单元（也就是，使用标准迎风、二阶或者 QUICK 方案），而不采用特殊的处理。

几何重建方案（The Geometric Reconstruction Scheme）

在几何重建方法中，在 FLUENT 中使用的标准插值方案用于获得界面通量，无论何时单元被充满一相另外的相。当单元靠近两相之间的界面时，使用几何重建方案。

几何重建方案使用分段线性的方法描绘了流体之间的界面。FLUENT 中这个方案是最精确的并适合于通用的非结构化网格。几何重建方案是从 Youngs[273]作品中为非结构化网格归纳出来的。它假定两流体之间的界面在每个单元内有个线性斜面，并使用这个线性形状为穿过单元面的流体的水平对流做计算。（See Figure 20.2.1.）

这个重建方案的第一步是计算相对于每个部分充满单元的中心的线性界面的位置，

基于关于容积分数和由单元引出的信息。第二步是计算穿过每个面的流体的水平对流量，使用计算的线性的界面描绘和关于面上的法向和切向速度分布的信息。第三步是使用前面的步骤中计算的通量平衡计算每个单元的容积分数。

！！当使用几何重建方案时，时间依赖解必须计算。同样，如果你使用正投影网格（也就是如果网格节点的位置是一样的在两个子区域相交的边界上），你必须确保在区域内没有双边（零厚度）的壁面。如果有，你必须分开它们，如 Section 5.7.8 中描述的。

物质接受方案（The Donor-Accepter Scheme）

在物质接受方法中，FLUENT 中使用的标准插值方案用于获得面的通量，无论何时单元内完全充满一相说其它相。当单元靠近两相之间的界面时，donor-acceptor 方案用于决定穿过面[93]的流体的水平对流量。这个方案把一个单元看作一定数量的流体来自一相和其它相的捐赠（donor），把相邻的单元看作相同数量流体的接受（acceptor），这样使用防止了界面上的数值扩散。来自对流跨过一个单元边界一相流体的数量受限于两个值的最小值：捐赠单元的充满容积和接受单元的自由容积。

界面的方向也用于决定面的通量。界面的方向是水平的还是垂直的，取决于单元内第 q 相的容积分数梯度的方向和问题中共享面的相邻单元。依靠界面的方向和它的运动，通过纯的迎风，纯的顺风或二者的联合获得通量值。

！！当物质接受方案使用时，必须计算时间依赖解。还有，物质接受方案仅用于四边形和六面体网格。另外，如果你使用了正投影网格（也就是如果网格节点的位置是一样的在两个子区域相交的边界上），你必须确保在区域内没有双边（零厚度）的壁面。如果有，你必须分开它们，如 Section 5.7.8 中描述的。

欧拉显式方案（The Euler Explicit Scheme）

在欧拉显式方法中，FLUENT 的标准的有限差分插值方案被用于前一时间步的容积分数的计算。

$$\frac{\alpha_q^{n+1}-\alpha_q^n}{\Delta t}V+\sum_f (U_f^n \alpha_{q,f}^n)=0 \qquad (20.2.8)$$

这里　n+1=新时间步的指标

n=前一时间步的指标

$\alpha_{q,f}$ = face value of the *q*th volume fraction, computed from the first- or second-order upwind or QUICK scheme

V=单元的容积

U_f = volume flux through the face, based on normal velocity

这个公式在每一时间步上不需要输送方程的迭代解，在隐式方案中是需要的。

！！当欧拉显式方案使用时，时间依赖解必须计算。

隐式方案（The Implicit Scheme）

在隐式插值方法中，FLUENT 的标准的有限差分插值方案用于获得所有单元的面通量包括那些界面附近的。

$$\frac{\alpha_q^{n+1}-\alpha_q^n}{\Delta t}V+\sum_f (U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1})=0 \qquad (20.2.9)$$

由于这个方程需要当前时间步的体积分数值（而不是上一时间步，关于欧拉显式方案），在每一时间步内标准的标量输送方程为每一个第二相的体积分数迭代性地求解。

隐式方案可用于时间依赖和稳态的计算。详细内容见 Section 20.6.4.

20.2.7 时间依赖（Time Dependence）

对时间依赖的 VOF 计算，方程 20.2.1 的求解使用显式的时间匹配方案。FLUENT 自动地为体积分数方程的积分细分时间步长，但是你可以通过修改 Courant 数影响这个时间步长。你可以选择每一时间步更新一次体积分数，或者每一时间步内的每一次迭代更新一次。这些选择更详细的讨论见 Section 20.6.12.

20.2.8 表面张力和壁面粘附（Surface Tension and Wall Adhesion）

VOF 模型也可以包含沿着每一对相之间的表面张力的影响。这个模型通过附加的说明相和壁面之间的接触角被增强了。

表面张力（surface Tension）

作为流体中分子之间的引力的结果，表面张力产生了。例如，考虑水中的一个气泡。在气泡内，由于其周围相邻分子的作用，作用在分子上的净力为零。然而，在表面上，净力是放射状地向内的，

跨过整个球面的径向分力的联合影响是表面收缩，因而增强了表面凹侧的压力。表面张力是一种仅作用在表面上的力，在这个例子中它必须是保持平衡的。它扮演了平衡内部放射状的分子引力和跨过表面的放射状的外部压力梯度的角色。在两种流体分离的地区，但是它们之一不是球泡的形式，表面张力的作用是通过减小界面的面积最小化自由能。

FLUENT 中表面张力模型是由 Brackbill et al[25]提出的连续表面力模型。用这个模型，VOF 计算中附加的表面张力导致了动量方程中的源项。为了理解这个源项的起源，考虑沿着表面表面张力为常数的的特殊情况，那些地方只考虑垂直于界面的力。可以看出，跨过表面的压降依赖于表面张力系数 σ 和通过两个半径的正交方向量度的表面曲率 R_1 *and* R_2：

$$p_2 - p_1 = \sigma(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) \qquad (20.2.10)$$

这里 p_1 *and* p_2 是两种流体界面两侧的压力。

在 FLUENT 中，使用 CSF 模型公式时，这里的表面曲率是从垂直于界面的表面的局部梯度计算的。n 为表面法线，定义 α_q 为第 q 相体积分数的梯度。

$$n = \nabla \alpha_q \qquad (20.2.11)$$

表面曲率 κ 是为了区别单位法向量 $\hat{n}$ [25]而定义的：

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n} \qquad (20.2.12)$$

这里

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} \qquad (20.2.13)$$

表面张力也可以根据越过表面的压力跳跃写出。表面力使用散度定理可以表示为体积力。正是这个体积力成了添加给动量方程的源项。它有如下形式：

$$F_{vol} = \sum_{pairs\ ij, i<j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i \kappa_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \qquad (20.2.14)$$

这个表达允许在多于两相存在的单元附近力光滑地叠加。如果一个单元中只有两相，那么 $\kappa_i = -\kappa_j$ *and* $\nabla \alpha_i = -\nabla \alpha_j$，方程 20.2.14 简化为：

$$F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (20.2.15)$$

这里 ρ 是使用方程 20.2.14 计算的容积平均密度。方程 20.2.15 显示了一个单元表面张力源项是与单元的平均密度成比例的。

注意三角形和四面体网格上表面张力影响的计算不如四边形和六面体网格的计算精确。所以表面张力影响最重要的地区应当采用四边形和六面体网格。

当表面张力的影响重要时（When Surface Tension Effects are Important）

表面张力影响重要性的决定是基于两个无量纲数：雷诺数 Re 和毛细数（capillary number）Ca 或雷诺数 Re 和韦伯数（Weber number）We。当 $\mathrm{Re} << 1$ 时，感兴趣的数是毛细数：

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (20.2.16)$$

当 $\mathrm{Re} >> 1$ 时，感兴趣的是韦伯数：

$$We = \frac{\sigma}{\rho L U^2} \quad (20.2.17)$$

这里 U 是自由流速度。如果 $Ca >> 1$ *or* $We << 1$ 表面张力效应可以忽略。

壁面粘附（Wall Adhesion）

与表面张力模型联合时选择指定一个壁面粘附角在 VOF 模型中也是有用的。这个模型是从 Brackbill et al[25]的作品中得来的。假定流体与壁面产生的接触角常用于调整壁面附近单元表面的法向，而不是加强壁面本身的边界条件。这个所谓的动力壁面边界条件导致了壁面附近表面曲率的调整。

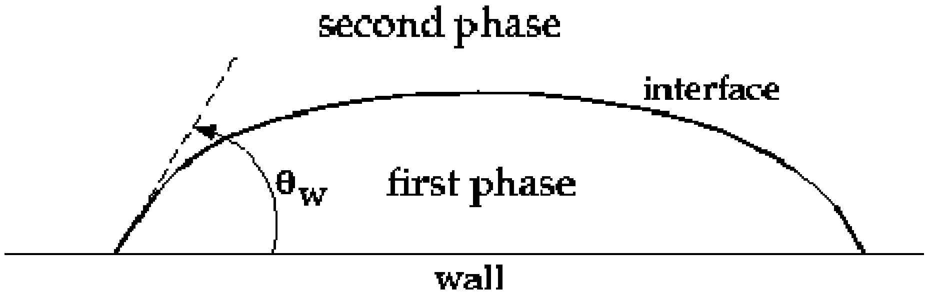
如果 θ_w 是壁面的接触角，那么挨着壁面的实际单元的表面法向为：

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos\theta_w + \hat{t}_w \sin\theta_w \quad (20.2.18)$$

这里 $\hat{n}_w$ *and* $\hat{t}_w$ 分别是壁面的单位法向量和切向量。这个接触角与一个单元正常计算的表面法向远离壁面的联合决定了表面的局部曲率，这个曲率常用于调整表面张力计算中的体积力项。

接触角 θ_w 壁面和壁面上界面切线的夹角，由 **Wall** panel 列表中成对的第一相里面量度，如图 20.2.2 所示。

Figure 20.2.2: Measuring the Contact Angle



20.3 混合模型（Mixture Model）

与 VOF 模型一样，混合模型使用单流体方法。它有两方面不同于 VOF 模型：

1. 混合模型允许相之间互相贯穿（interpenetrating）。所以对一个控制容积的体积分数 α_q *and* α_p 可以是 0 和 1 之间的任意值，取决于相 q 和相 p 所占有的空间。
2. 混合模型使用了滑流速度的概念，允许相以不同的速度运动。（注，相也可以假定以相同的速度运动，混合模型就简化为均匀多相流模型）。

混合模型求解混合相的连续性方程，混合的动量方程，混合的能量方程，第二相的体积分数方程，还有相对速度的代数表达（如果相以以不同的速度运动）。

20.3.1 混合模型的连续方程（Continuity Equation for the Mixture）

混合模型的连续方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m)+\nabla\cdot(\rho_m\vec{v}_m)=\dot{m} \qquad (20.3.1)$$

这里 $\vec{v}_m$ 是质量平均速度：

$$\vec{v}_m=\frac{\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k\vec{v}_k}{\rho_m} \qquad (20.3.2)$$

ρ_m 是混合密度：

$$\rho_m=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k \qquad (20.3.3)$$

α_k 是第 k 相的体积分数。

$\dot{m}$ 描述了由于气穴（described in Section 20.5）或用户定义的质量源的质量传递。

20.3.2 混合模型的动量方程（Momentum Equation for the Mixture）

混合模型的动量方程可以通过对所有相各自的动量方程求和来获得。它可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m\vec{v}_m)+\nabla\cdot(\rho_m\vec{v}_m\vec{v}_m)=-\nabla p+\nabla\cdot\left[\mu_m\left(\nabla\vec{v}_m+\nabla\vec{v}_m^{\mathrm{T}}\right)\right]+ \\ \rho_m\vec{g}+\vec{F}+\nabla\cdot\left(\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k\vec{v}_{\mathrm{dr},k}\vec{v}_{\mathrm{dr},k}\right) \qquad (20.3.4)$$

这里 n 是相数，$\vec{F}$ 是体积力，μ_m 是混合粘性：

$$\mu_m = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \mu_k \qquad (20.3.5)$$

$\vec{v}_{dr,k}$ 是第二相 k 的飘移速度：

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \qquad (20.3.6)$$

20.3.3 混合模型的能量方程（Energy Equation for the Mixture）

混合模型的能量方程采用如下形式：

$$\frac{\partial}{\partial t}\sum_{k-1}^{n}(\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k-1}^{n}(\alpha_k \vec{v}_k(\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E \qquad (20.3.7)$$

这里 k_{eff} 是有效热传导率（$k + k_t$，这里 k_t 是紊流热传导率，根据使用的紊流模型定义）。

方程 20.3.7 右边的第一项代表了由于传导造成的能量传递。S_E 包含了所有的体积热源。

在方程 20.3.7 中,

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \qquad (20.3.8)$$

对可压缩相；而 $E_k = h_k$ 是对不可压缩相的，这里 h_k 是第 k 相的 sensible enthalpy。

20.3.4 相对（滑流）速度和漂移速度（Relative (slip)Velocity and the Drift Velocity）

相对速度（也指滑流速度）被定义为第二相（ p ）的速度相对于主相（ q ）的速度：

$$\vec{v}_{qp} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \qquad (20.3.9)$$

漂移速度和相对速度（$\vec{v}_{qp}$ ）通过以下表达式联系：

$$\vec{v}_{\text{dr},p} = \vec{v}_{qp} - \sum_{k-1}^{n} \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_{qk} \qquad (20.3.10)$$

FLUENT 中的混合模型使用了代数滑移公式。代数滑移混合模型的基本假设是规定相对速度的代数关系，相之间的局部平衡应在短的空间长度标尺上达到。相对速度的形式由以下给出：$\vec{v}_{qp} = \tau_{qp}\vec{a}$ （20.3.11）

这里 $\vec{a}$ 是第二相粒子的加速度，τ_{qp} 是粒子的弛豫时间。根据 Manninen et al[150] τ_{qp} 的形式为

$$\tau_{qp} = \frac{(\rho_m - \rho_p)d_p^2}{18\mu_q f_{\text{drag}}} \qquad (20.3.12)$$

这里 d_p 是第二相颗粒（或液滴或气泡）的直径，曳力函数 f_{drag} 来自 Schiller 和 Naumann[202]：

$$f_{\mathrm{drag}} = \begin{cases} 1+0.15\mathrm{Re}^{0.687} & \mathrm{Re} \le 1000 \\ 0.0183\mathrm{Re} & \mathrm{Re} > 1000 \end{cases} \quad (20.3.13)$$

加速度 $\bar{a}$ 的形式为：

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla)\vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (20.3.14)$$

最简单的代数滑移公式是所谓的漂移流量模型，其中粒子的加速度由重力或离心力给出粒子的弛豫时间考虑其它粒子的存在而被修正。

注意，如果没求解滑移速度，混合模型就简化成了均匀多相流模型。除此之外，混合模型还可以为滑移速度使用其它代数滑移方法来用户定制化（用户定义函数）。详细内容见单独的 UDF 手册。

20.3.5 第二相的体积分数方程（Volume Fraction Equation for the Secondary Phases）

从第二相 p 的连续方程，可以得到第二相 p 的体积分数方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{\mathrm{dr},p}) \quad (20.3.15)$$

20.4 欧拉模型（Eulerian Model）

单相模型中，只求解一套动量和连续性的守恒方程，为了实现从单相模型到多相模型的改变，必须引入附加的守恒方程。在引入附加的守恒方程的过程中，必须修改原始的设置。这个修改涉及到多相体积分数 $\alpha_1, \alpha_2, \ldots \alpha_n$ 的引入和相之间动量交换的机理。

20.4.1 体积分数（Volume Fractions）

作为互相贯穿连续的多相流动的描述组成了相位体积分数的概念，这里表示为 α_q。体积分数代表了每相所占据的空间，并且每相独自地满足质量和动量守恒定律。守恒方程的获得可以使用全体平均每一相[3]的局部瞬态平衡或者使用混合理论方法[22]。

q 相的体积 V_q 定义为

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (20.4.1)$$

这里 $\sum_{q=1}^{n} \alpha_q = 1$ （20.4.2）

q 相的有效密度为

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (20.4.3)$$

这里 ρ_q 是 q 相的物理密度。

20.4.2 守恒方程（Conservation Equations）

由 FLUENT 求解的通用的守恒方程在这部分给出，随后是求解这些方程。

方程的通用形式（Equations in General Form）

质量守恒

q 相的连续方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q)+\nabla\cdot(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q)=\sum_{p=1}^{n}\dot{m}_{pq}$$

（20.4.4）

这里$\vec{v}_q$是q相的速度，$\dot{m}_{pq}$表示了从第p相到q相的质量传递。从质量守恒方程可得

$$\dot{m}_{pq}=-\dot{m}_{qp}$$

（20.4.5）

和$\dot{m}_{pp}=0$ （20.4.6）

动量守恒

q 相的动量平衡产生了

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q)+\nabla\cdot(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\vec{v}_q)=-\alpha_q\nabla p+\nabla\cdot\overline{\overline{\tau}}_q+\sum_{p=1}^{n}(\vec{R}_{pq}+\dot{m}_{pq}\vec{v}_{pq})+\alpha_q\rho_q(\vec{F}_q+\vec{F}_{lift,q}+\vec{F}_{Vm,q})$$

（20.4.7）

这里$\overline{\overline{\tau}}_q$是第$q$相的压力应变张量（stress-strain tensor）

$$\overline{\overline{\tau}}_q=\alpha_q\mu_q(\nabla\vec{v}_q+\nabla\vec{v}_q^{\mathrm{T}})+\alpha_q(\lambda_q-\frac{2}{3}\mu_q)\nabla\cdot\vec{v}_q\overline{\overline{I}}$$

(20.4.8)

这里μ_q *and* λ_q是q相的剪切和体积粘度，$\vec{F}_q$是外部体积力，$\vec{F}_{lift,q}$是升力，$\vec{F}_{Vm,q}$是虚拟质量力，$\vec{R}_{pq}$是相之间的相互作用力，p是所有相共享的压力。

$\vec{v}_{pq}$是相间的速度，定义如下。如果$\dot{m}_{pq}>0$（也就是，相p的质量传递到相q），$\vec{v}_{pq}=\vec{v}_p$；如果$\dot{m}_{pq}<0$（也就是，相q的质量传递到相p），$\vec{v}_{pq}=\vec{v}_q$；和$\vec{v}_{pq}=\vec{v}_{qp}$。

方程 20.4.7 必须有合适的表达为相间作用力$\vec{R}_{pq}$封闭。这个力依赖于摩擦，压力，内聚力和其它影响，并服从条件$\vec{R}_{pq}=-\vec{R}_{qp}$ *and* $\vec{R}_{pq}=0$.

FLUENT 使用下面形式的相互作用项：

$$\sum_{p=1}^{n}\vec{R}_{pq}=\sum_{p=1}^{n}K_{pq}(\vec{v}_p-\vec{v}_q)$$

（20.4.9）

这里$K_{pq}(=K_{qp})$是相间动量交换系数（described in Section 20.4.3）.

升力

对多相流动，FLUENT 能包含第二相粒子（或液滴或气泡）的升力的影响。这些升力作用于粒子主要是由于主相流场的速度梯度。对大的粒子，升力更重要，但是 FLUENT 的模型假定粒子的直径远小于粒子间的距离。这样，对 closely packed particles 和非常小的粒子包含升力就不合适了。

主相q中作用于第二相p的升力由下式计算[57]：

$$F_{\text{lift}} = -0.5\rho_q\alpha_p|\vec{v}_q - \vec{v}_p| \times (\nabla \times \vec{v}_q) \qquad (20.4.10)$$

升力F_{lift}将会为两相添加到动量方程的右边（$F_{lift,q} = -F_{lift,p}$）。

大多数情形下，升力相对于曳力是不重要的，因此不必要包含这个额外的项。如果升力是重要的（例如，如果相分离很快），包含这项是合适的。默认情况，F_{lift}是不包含的。如果需要，升力和升力系数应为每一对相指定。

虚拟质量力

对多相流动，当第二相p相对于主相q加速时，FLUENT 包含虚拟质量的影响。主相质量的惯性遇到加速的粒子（或液滴或气泡）对粒子施加一个虚拟质量力[57]：

$$F_{\text{vm}} = 0.5\alpha_p\rho_q\left(\frac{d_q v_q}{dt} - \frac{d_p v_p}{dt}\right) \qquad (20.4.11)$$

$\frac{dq}{dt}$相表示了从下式中派生出来的相物质时间：

$$\frac{d_q(\phi)}{dt} = \frac{\partial(\phi)}{\partial t} + (\vec{v}_q \cdot \nabla)\phi \qquad (20.4.12)$$

虚拟质量力F_{Vm}将会为两相添加到动量方程的右边（$F_{Vm,q} = -F_{Vm,p}$）。

当第二相的密度远小于主相的密度时，虚拟质量影响是重要的（e.g., for a transient bubble column）。默认情况，F_{Vm}是不包含的。

FLUENT 求解的方程

FLUENT 求解的液-液和颗粒多相流动的方程，列举如下作为n相流动的一般情形。

连续方程

每相的体积分数从连续方程计算：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q\vec{v}_q) = \frac{1}{\rho_q}\left(\sum_{p=1}^{n}\dot{m}_{pq} - \alpha_q\frac{d_q\rho_q}{dt}\right) \qquad (20.4.13)$$

对每个第二相的这个方程的解连同体积分数的和为 1 的条件（由方程 20.4.2 给出），允许为主相体积分数计算。这种处理对液-液和颗粒流动是公用的。

液-液动量方程

流体相q的动量守恒方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\right) + \nabla \cdot \left(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\vec{v}_q\right) = -\alpha_q\nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_q + \alpha_q\rho_q\vec{g}$$
$$+\alpha_q\rho_q(\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{Vm,q}) + \sum_{p=1}^{n}\left(K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq}\vec{v}_{pq}\right)$$

（20.4.14）

这里$\vec{g}$由于重力的重力加速度，$\vec{F}_q, \vec{F}_{lift,q}, and\ \vec{F}_{Vm,1}$的定义见方程 20.4.7。

液体-固体动量方程

下列作品中[2，32，50，76，131，145，167，235]，FLUENT 使用 multi-fluid granular model 来描述液体-固体的混合行为。固体相应力来自于颗粒碰撞产生的随机粒子运动和气体分子的热扩散之间的类比，并考虑了颗粒相无伸缩性。正如气体的情形，颗粒速度波动的强度决定了应力、粘度和固相的压力。与颗粒速度相关的动能被假想热能（pseudothermal）或者与粒子随机运动平方成比例的颗粒温度所描绘。

液体相的动量守恒方程相似于方程 20.4.14，固体相 s^{th} 的为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_s\rho_s\vec{v}_s\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_s\rho_s\vec{v}_s\vec{v}_s\right)=-\alpha_s\nabla p-\nabla p_s+\nabla\cdot\overline{\overline{\tau_s}}+\alpha_s\rho_s\vec{g}$$
$$+\alpha_s\rho_s(\vec{F}_s+\vec{F}_{lift,s}+\vec{F}_{Vm,s})+\sum_{l=1}^{n}\left(K_{ls}(\vec{v}_l-\vec{v}_s)+\dot{m}_{ls}\vec{v}_{ls}\right)$$

（20.4.15）

这里 p_s 是 s^{th} 固体压力，$K_{ls}=K_{sl}$ 是液体或固体相 l 和固体相 s 之间的动量交换系数，n 为相的总数，$\vec{F}_q, \vec{F}_{lift,q}, and\ \vec{F}_{Vm,q}$ 的定义见方程 20.4.7。

20.4.3 相间交换系数（Interphase Exchange Coefficients）

从方程 20.4.14 和 20.4.15 可以看出相之间的动量交换是以液-液交换系数 K_{pq} 的值为基础的，对颗粒流动，液-固和固-固交换系数为 K_{ls}。

液-液交换系数

对液-液流动，每个第二相被假定为液滴或气泡的形式。如何把流体中的一相指定为颗粒相有着重要的影响。例如，流动中有不同数量的两种流体，起支配作用的流体应作为主要流体，由于稀少的流体更可能形成液滴或气泡。这些气泡，液-液或气-液混合类型的交换系数可以写成以下通用形式：

$$K_{pq}=\frac{\alpha_p\rho_p f}{\tau_p}$$

（20.4.16）

这里，曳力函数 f 对不同的交换系数模型定义不同（如下面的描述），颗粒弛豫时间 τ_p 定义为：

$$\tau_p=\frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q}$$

（20.4.17）

这里 d_p 是 p 相液滴或气泡的直径。

几乎所有 f 的定义都包含一个基于相对雷诺数（Re）的曳力系数（C_D）。这个曳力函数在不同的交换系数模型中是不同的。

1．Schiller and Naumann[202]模型：$f=\frac{C_D Re}{24}$ （20.4.18）

这里

$$C_D = \begin{cases} 24(1+0.15Re^{0.687})/Re & Re \le 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$$ （20.4.19）

Re 是相对雷诺数。主相 q 和第二相 p 的相对雷诺数从下式获得

$$Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q}$$ （20.4.20）

第二相 p 和 r 的相对雷诺数从下式获得

$$Re = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p| d_{rp}}{\mu_{rp}}$$ （20.4.21）

这里 $\mu_{rp} = \alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r$ 是相 p 和 r 的混合速度。

2． Morsi and Alexander 模型[163]：

$$f = \frac{C_D Re}{24}$$ (20.4.22)

这里 $C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$ （20.4.23）

Re 数由方程 20.4.20 和 20.4.21 定义。$a_1, a_{2,} a_3$ 定义如下：

$$a_1,\ a_2,\ a_3 = \begin{cases} 0,\ 18,\ 0 & 0 < Re < 0.1 \\ 3.690,\ 22.73,\ 0.0903 & 0.1 < Re < 1 \\ 1.222,\ 29.1667,\ -3.8889 & 1 < Re < 10 \\ 0.6167,\ 46.50,\ -116.67 & 10 < Re < 100 \\ 0.3644,\ 98.33,\ -2778 & 100 < Re < 1000 \\ 0.357,\ 148.62,\ -47500 & 1000 < Re < 5000 \\ 0.46,\ -490.546,\ 578700 & 5000 < Re < 10000 \\ 0.5191,\ -1662.5,\ 5416700 & Re \ge 10000 \end{cases}$$

（20.4.24）

Morsi and Alexander 模型是最完善的，频繁地在雷诺数的大范围内调整函数定义，但是采用这个模型比其它模型更不稳定。

3． 对称模型

$$K_{pq} = \frac{\alpha_p(\alpha_p\rho_p + \alpha_q\rho_q) f}{\tau_{pq}}$$ （20.4.25）

这里

$$\tau_{pq} = \frac{(\alpha_p\rho_p + \alpha_q\rho_q)(\frac{d_p+d_q}{2})^2}{18(\alpha_p\mu_p + \alpha_q\mu_q)}$$ （20.4.26）

$$f = \frac{C_D Re}{24} \qquad (20.4.27)$$

$$C_D = \begin{cases} 24(1+0.15Re^{0.687})/Re & Re \le 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \qquad (20.4.28)$$

Re 数由方程 20.4.20 或 20.4.21 定义。

在流动中，区域内的某个地方的第二相（分散相）变成主相（连续相）在另一个区域。例如，如果空气注入充满一半水的容器的底部，在容器的底半部空气是分散相，在容器的顶半部，空气是连续相。这个模型也用于两相之间的相互作用。

你可以为每一对相指定不同的交换系数。为每一对相使用用户定义函数定义交换系数也是可能的。如果交换系数等于零（也就是，交换系数没有指定），流体的流动区域将会独立地计算，并使用这个唯一的相互作用作为每个计算单元内它们补充的体积分数。

液体-固体交换系数

液体-固体的交换系数 K_{sl} 以下面的通用形式写出：

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \qquad (20.4.29)$$

这里 f 对不同的交换系数模型（如下描述）定义不同，颗粒的弛豫时间 τ_s 定义为

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_l} \qquad (20.4.30)$$

这里 d_s 是 s 相颗粒的直径。

所有 f 的定义都包含基于相对雷诺数的曳力函数。这个曳力函数在不同的交换系数模型中是不同的。

1. Syamlal-O'Brien 模型[234]

$$f = \frac{C_D Re_s \alpha_l}{24 v_{r,s}^2} \qquad (20.4.31)$$

这里曳力函数采用由 Dalla Valle[47]给出的形式：

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s / v_{r,s}}}\right)^2 \qquad (20.4.32)$$

这个模型是基于流化床或沉淀床颗粒的末端速度的测量，并使用了体积分数和相对雷诺数的函数关系式[193]：

$$Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l} \qquad (20.4.33)$$

这里下标 l 是第 l 液体相，s 是第 s 固体相，d_s 是第 s 固体相颗粒的直径。

液体-固体交换系数有如下形式

$$K_{sl} = \frac{3\alpha_s \alpha_l \rho_l}{4 v_{r,s}^2 d_s} C_D \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_l| \qquad (20.4.34)$$

这里 $v_{r,s}$ 是与固体相相关的末端速度[73]：

$$v_{r,s} = 0.5 \left(A - 0.06 Re_s + \sqrt{(0.06 Re_s)^2 + 0.12 Re_s (2B - A) + A^2} \right) \qquad (20.4.35)$$

其中

$$A = \alpha_l^{4.14} \qquad (20.4.36)$$

对 $\alpha_l \le 0.85$，$$B = 0.8 \alpha_l^{1.28} \qquad (20.4.37)$$

对 $\alpha > 0.85$，$$B = \alpha_l^{2.65} \qquad (20.4.38)$$

当固体相的剪切应力根据 Syamlal et al 定义时[235]（方程 20.4.52），这个模型是合适的。

2．对 Wen and Yu 模型[262]，液体-固体交换系数有如下形式：

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} \alpha_l^{-2.65} \qquad (20.4.39)$$

这里，

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} \left[1 + 0.15 (\alpha_l Re_s)^{0.687} \right] \qquad (20.4.40)$$

Re 数由方程 20.4.33 定义。

这个模型适合于稀释系统。

3．Gidaspow 模型[76]是 Wen and Yu 模型[262]和 Ergun 方程[62]的联合。

当 $\alpha_l > 0.8$ 时，液体-固体交换系数 K_{sl} 有如下形式：

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} \alpha_l^{-2.65} \qquad (20.4.41)$$

这里 $$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} \left[1 + 0.15 (\alpha_l Re_s)^{0.687} \right] \qquad (20.4.42)$$

当 $\alpha_l \le 0.8$ 时，

$$K_{sl} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_l) \mu_l}{\alpha_l d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_l \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} \qquad (20.4.43)$$

对密集的流化床，建议使用这个模型。

固体-固体交换系数

固体-固体交换系数 K_{ls} 有如下形式[233]:

$$K_{ls} = \frac{3\left(1+e_{ls}\right)\left(\frac{\pi}{2}+C_{\mathrm{fr},ls}\frac{\pi^2}{8}\right)\alpha_s\rho_s\alpha_l\rho_l\left(d_l+d_s\right)^2 g_{0,ls}}{2\pi\left(\rho_l d_l^3+\rho_s d_s^3\right)}\left|\vec{v}_l-\vec{v}_s\right| \tag{20.4.44}$$

这里

e_{ls} =归还系数（Section 20.4.4 中描述）

$C_{fr,ls}$ =第 l 和第 s 相之间的摩擦系数

固体相颗粒（$C_{fr,ls}=0$）

d_l =固体 l 颗粒的直径

$g_{0,ls}$ =径向分布系数（Section 20.4.4 中描述）。

20.4.4 固体压力（Solids Pressure）

对可压缩机制下的颗粒流动（也就是，固体的体积分数小于允许的最大值的地方），固体压力独立计算，并且用作颗粒相动量方程中的压力梯度相 ∇p_s。因为 Maxwellian 速度分布用于颗粒，颗粒温度引入了模型，并出现在固体压力和粘度的表达式中。由于颗粒的碰撞，固体压力由动能项和第二相组成：

$$p_s = \alpha_s\rho_s\Theta_s + 2\rho_s(1+e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss}\Theta_s \tag{20.4.45}$$

这里 e_{ss} 是颗粒碰撞的归还系数，$g_{0,ss}$ 是径向分布函数，Θ_s 是颗粒温度。FLUENT 为 e_{ss} 使用默认值 0.9，但是这个值能调整以适合颗粒类型。颗粒温度 Θ_s 是与颗粒运动的波动动能成比例的，将在本部分的后面描述。函数 $g_{0,ss}$（更详细的内容下面描述）是分布函数，这个函数控制了从 $\alpha<\alpha_{s,\max}$（这里固体颗粒之间的距离可以继续减小）的可压缩条件到 $\alpha=\alpha_{s,\max}$（这里距离的进一步减小不会发生）的不可压缩条件。$\alpha_{s,\max}$ 的默认值是 0.63，但是在问题设置过程中你可以修改。

径向分布函数

径向分布函数 g_0 是一个当固体颗粒相变密时用于修改颗粒之间碰撞概率的修正因子。这个函数也可解释为小球之间的无量纲距离：

$$g_0 = \frac{s+d_p}{s} \tag{20.4.46}$$

这里 s 是颗粒之间的距离。从方程 20.4.46 可以观察出对稀疏固体相 $s \to \infty$, 所以 $g_0 \to 1$。

当固体相紧凑到一定限制内，$s \to 0$ and $g0 \to \infty$。径向分布函数与非均匀气体的 Chapman and Cowling's[32]理论的 χ 因子紧密联系。对稀有气体， χ 等于 1，当分子靠的非常近以致运动不可能发生时，它会逐渐增加并趋向无穷大。

文献中，径向分布函数没有统一的公式。FLUENT 采用文献[167]中推荐的：

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1} \qquad (20.4.47)$$

当固体相数大于 1 时，方程 20.4.47 扩展为：

$$g_{0,ll} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_l}{\alpha_{l,\max}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1} \qquad (20.4.48)$$

这里 $\alpha_{l,\max}$ 是由你在问题的设置过程中指定的，并且

$$g_{0,lm} = \frac{d_m g_{0,ll} + d_l g_{0,mm}}{d_m + d_l} \qquad (20.4.49)$$

20.4.5 固体剪切应力（Solids Shear Stresses）

固体应力张量包含由于平移和碰撞从颗粒的动量交换中产生的剪切和体积粘性。粘性的摩擦分量也可以包含在当固体颗粒相达到最大固体颗粒分数时出现的粘塑性变迁中。

碰撞和动能部分，可选择的摩擦部分，一起给出了固体剪切粘度：

$$\mu_s = \mu_{s,\text{col}} + \mu_{s,\text{kin}} + \mu_{s,\text{fr}} \qquad (20.4.50)$$

碰撞粘性（Collisional Viscosity）

剪切粘度的碰撞部分模化为[76，235]

$$\mu_{s,\text{col}} = \frac{4}{5}\alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss}(1 + e_{ss})\left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \qquad (20.4.51)$$

动力粘度（Kinetic Viscosity）

FLUENT 为动力部分提供了两种表达。

默认的是 Syamlal et al [235]表达：

$$\mu_{s,\text{kin}} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})}\left[1 + \frac{2}{5}(1 + e_{ss})(3e_{ss} - 1)\alpha_s g_{0,ss}\right] \qquad (20.4.52)$$

下面可选择的 Gidaspow et al[76]表达也是有效的：

$$\mu_{s,\text{kin}} = \frac{10\rho_s d_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{96\alpha_s(1 + e_{ss})g_{0,ss}}\left[1 + \frac{4}{5}g_{0,ss}\alpha_s(1 + e_{ss})\right]^2 \qquad (20.4.53)$$

体积粘度（Bulk Viscosity）

固体体积粘度解释为颗粒压缩和扩张的抵抗力。根据 Lun et al[145]它有以下形式：

$$\lambda_s = \frac{4}{3}\alpha_s\rho_s d_s g_{0,ss}(1+e_{ss})\left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \qquad (20.4.54)$$

注：默认时，体积粘度被设置为常数 0。选择 Lun et al 表达或用户定义函数也是可能的。

摩擦粘度（Frictional Viscosity）

在低剪切密集流动中，固体的第二相体积分数接近于压缩极限，应力的产生主要是由于颗粒之间的摩擦。默认情况，由 FLUENT 计算的固体剪切粘度不解释为颗粒之间的摩擦。

如果计算中包含摩擦粘度，FLUENT 使用 Schaeffer's[200]表达：

$$\mu_{s,\mathrm{fr}} = \frac{p_s \sin\phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \qquad (20.4.55)$$

这里 p_s 是固体压力，ϕ 是内部摩擦角，I_{2D} 是偏应力张量的第二不变式。它也可以被指定为常数或用户定义摩擦粘度。

20.4.6 颗粒温度（Granular Temperature）

第 s 固体相的颗粒温度是与颗粒的随机运动的动能成比例的。从动能理论得到的输运方程采用如下形式[50]：

$$\frac{3}{2}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s\alpha_s\Theta_s)+\nabla\cdot(\rho_s\alpha_s\vec{v}_s\Theta_s)\right]=(-p_s\overline{\overline{I}}+\overline{\overline{\tau}}_s):\nabla\vec{v}_s$$
$$\nabla\cdot(k_{\Theta_s}\nabla\Theta_s)-\gamma\Theta_s+\phi_{ls} \qquad (20.4.56)$$

这里

$(-p_s\overline{\overline{I}}+\overline{\overline{\tau}}_s):\nabla\vec{v}_s$ =the generation of energy by the solid stress tensor

$k_{\Theta_s}\nabla\Theta_s$ =能量扩散（k_{Θ_s} 是扩散系数）

$\gamma\Theta_s$ =能量的碰撞耗散

ϕ_{ls} =第 l 相液体或固体相和第 s 固体相之间的能量交换

方程 20.4.56 包含描述了颗粒能量扩散通量的 $k_{\Theta_s}\nabla\Theta_s$ 项。

能量的碰撞耗散 $\gamma\Theta_s$ 代表了由于颗粒之间的碰撞在第 s 固体相内的能量耗散率。这项也可以由 Lun et al[145]得来的表达描述：

$$\gamma_{\Theta m} = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_{0,ss}}{d_s\sqrt{\pi}}\rho_s\alpha_s^2\Theta_s^{3/2} \qquad (20.4.57)$$

从第 s 固体相到第 l 液体或固体相粒子速度的随机波动动能的传递由 ϕ_{ls} [76]描述：

$$\phi_{ls} = -3K_{ls}\Theta_s \qquad (20.4.58)$$

FLUENT 当前使用颗粒温度的代数关系。这可以通过忽略输运方程中的对流和扩散获

得方程 20.4.56[235]。

20.4.7 紊流模型(Turbulence Models)

为了描述单相中速度及标量的紊流、波动的影响，FLUENT 使用了不同类型的封闭模型，如第 10 章所述。与单相流动相比，多相流动动量方程中所模拟的项数是非常大的，这使得多相流模拟中的紊流模型非常复杂。

在 $k-\varepsilon$ 模型内 FLUENT 提供了三种方法模拟多相流中的紊流：

1． mixture turbulence model (default)
2． dispersed turbulence model
3． Turbulence model for each phase

模型的选择依赖于你的应用中第二相紊流的重要性。

!!注：下面给出的每一种方法的描述都是基于标准 $k-\varepsilon$ 模型。多相修正为 RNG 和 realizable $k-\varepsilon$ 模型是相似的，因此这里不在明确地给出。

混合紊流模型（Mixture Turbulence Model）

混合紊流模型是默认的多相紊流模型。它代表了单相 $k-\varepsilon$ 模型的第一扩展，它应用于相分离，分层（或接近分层）的多相流，和相之间的密度比接近 1。这种情形下，使用混合属性和混合速度捕获紊流的重要特征是足够的。

描述这个模型的 k *and* ε 方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla\cdot(\rho_m \vec{v}_m k) = \nabla\cdot\left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k}\nabla k\right) + G_{k,m} - \rho_m \epsilon \qquad (20.4.59)$$

和

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \epsilon) + \nabla\cdot(\rho_m \vec{v}_m \epsilon) = \nabla\cdot\left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon}\nabla \epsilon\right) + \frac{\epsilon}{k}(C_{1\epsilon} G_{k,m} - C_{2\epsilon}\rho_m \epsilon) \qquad (20.4.60)$$

这里混合密度 ρ_m 和混合速度 $\vec{v}_m$ 从下式计算：

$$\rho_m = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \rho_i \qquad (20.4.61)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i \rho_i \vec{v}_i}{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i \rho_i} \qquad (20.4.62)$$

紊流粘度 $\mu_{t,m}$ 从下式计算：

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \qquad (20.4.63)$$

紊流动能的产生 $G_{k,m}$ 由下式计算：

$$G_{k,m} = \mu_{t,m}(\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T) : \nabla \vec{v}_m \qquad (20.4.64)$$

这些方程中的常数与 Section 10.4.1 中单相 $k-\varepsilon$ 模型的描述相同。

分散紊流模型（Dispersed Turbulence Model）

当第二相的浓度稀时，分散紊流模型是合适的模型。这种情形下，颗粒间的碰撞可忽略而对第二相随机运动的起支配作用的是主相紊流的影响。所以第二相的波动量根据主相的平均特征和颗粒弛豫时间和粒子相互作用时间的旋涡给出。

当明显地有一个主连续相和其它的是分散稀释的第二相时，这个模型是适用的。

假设（Assumptions）

FLUENT 中模拟紊流的分散方法涉及到以下假设：

1. 对连续相修正 $k-\varepsilon$ 模型：连续相紊流预测是使用标准 $k-\varepsilon$ 模型并补充包含相间紊流动量传递的附加项获得的。
2. 对离散相用 Tchen-theory 关系：分散相紊流量度的预测是使用均匀紊流离散粒子的 Tchen 传播理论获得的。
3. 相间紊流动量传递：在紊流多相流动中，动量交换项包含了分散相瞬态分布和紊流流体运动之间的关系。考虑通过紊流流体运动输送分散相的传播是可能的。
4. 相加权平均方法：在模拟紊流多相流的传播是平均方法的选择是有影响的。两步平均法会导致出现相体积分数的波动。然而，当使用两步平均法加对紊流的相加权平均时，体积分数的紊流波动不会出现。FLUENT 使用相加权平均，因此没有体积分数的波动引入连续方程。

连续相中的紊流（Turbulence in the Continuous Phase）

涡粘性模型常用于计算平均波动量。连续相 q 的雷诺应力张量采用如下形式：

$$\bar{\bar{\tau}}''_q = -\frac{2}{3}(\rho_q k_q + \rho_q \mu_{t,q} \nabla \cdot \vec{U}_q)\bar{\bar{I}} + \rho_q \mu_{t,q}(\nabla \vec{U}_q + \nabla \vec{U}_q^{\,T}) \qquad (20.4.65)$$

这里 $\vec{U}_q$ 是相加权速度。

根据 q 相的紊流动能，紊流粘度 $\mu_{t,q}$ 写出如下：

$$\mu_{t,q} = \rho_q C_\mu \frac{k_q^2}{\epsilon_q} \qquad (20.4.66)$$

载能紊流涡的特征时间定义如下：

$$\tau_{t,q} = \frac{3}{2} C_\mu \frac{k_q}{\epsilon_q} \qquad (20.4.67)$$

这里 ε_q 是耗散率，$C_\mu = 0.09$。

紊流涡的长度标尺为：

$$L_{t,q} = \sqrt{\frac{3}{2}} C_\mu \frac{k_q^{\frac{3}{2}}}{\epsilon_q} \qquad (20.4.68)$$

紊流预测从修正的 $k-\varepsilon$ 模型获得：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q k_q\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_q \rho_q \vec{U}_q k_q\right)=\nabla\cdot\left(\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_k}\nabla k_q\right)+\alpha_q G_{k,q}-\alpha_q \rho_q \varepsilon_q+\alpha_q \rho_q \prod_{k_q}$$

（20.4.69）

和

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \varepsilon_q)+\nabla\cdot\left(\alpha_q \rho_q \vec{U}_q \varepsilon_q\right)=\nabla\cdot(\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_\varepsilon}\nabla\varepsilon_q)+\alpha_q \frac{\varepsilon_q}{k_q}(C_{1\varepsilon}G_{k,q}-C_{2\varepsilon}\rho_q \varepsilon_q)+\alpha_q \rho_q \prod_{\varepsilon_q}$$

（20.4.70）

这里 $\prod_{k_q}$ *and* $\prod_{\varepsilon_q}$ 代表了分散相对连续相 q 的影响，$G_{k,q}$ 代表了紊流动能的产生，见 Section 10.4.4 中定义。所有其它项与单相 $k-\varepsilon$ 模型中的有相同的意义。

$\prod_{k_q}$ 项可从连续相的瞬态方程获得并采用如下形式，这里 M 代表第二相的数量：

$$\Pi_{k_q} = \sum_{p=1}^{M} \frac{K_{pq}}{\alpha_q \rho_q} (< \vec{v}''_q \cdot \vec{v}''_p > + (\vec{U}_p - \vec{U}_q) \cdot \vec{v}_{\rm dr})$$

（20.4.71）

它可以简化为：

$$\Pi_{k_q} = \sum_{p=1}^{M} \frac{K_{pq}}{\alpha_q \rho_q} (k_{pq} - 2k_q + \vec{v}_{pq} \cdot \vec{v}_{\rm dr})$$

（20.4.72）

这里 k_{lq} 是连续相 q 的分散相 l 的速度的协方差（从下面的方程 20.4.80 计算得），$\vec{v}_{pq}$ 是相对速度，$\vec{v}_{dr}$ 是漂移速度（由下面的方程 20.4.85 定义)。

$\prod_{\varepsilon_q}$ 根据 Elgobashi et al[61]模化：

$$\Pi_{\epsilon_q} = C_{3\epsilon} \frac{\epsilon_q}{k_q} \Pi_{k_q}$$

（20.4.73）

这里 $C_{3\varepsilon}=1.2$。

分散相中的紊流（Turbulence in the Dispersed Phase）

表征运动的时间和长度标尺用于估计传播（dispersion）系数,相关函数和每一分散相的紊流动能。

和作用于离散相 p 的惯性影响相连接的特征粒子弛豫时间定义为：

$$\tau_{F,pq} = \alpha_p \rho_p K_{pq}^{-1} \left(\frac{\rho_p}{\rho_q} + C_V \right)$$

（20.4.74）

沿着颗粒轨道计算的 Lagrangian 积分时间标尺，主要受交叉轨道的影响[43]，定义为：

$$\tau_{t,pq} = \frac{\tau_{t,q}}{\sqrt{(1 + C_\beta \xi^2)}} \qquad (20.4.75)$$

这里

$$\xi = \frac{|\vec{v}_{pq}|\tau_{t,q}}{L_{t,q}} \qquad (20.4.76)$$

$$C_\beta = 1.8 - 1.35\cos^2\theta \qquad (20.4.77)$$

这里θ是平均颗粒速度和平均相对速度的夹角。这些中的两个特征时间比值写作：

$$\eta_{pq} = \frac{\tau_{t,pq}}{\tau_{F,pq}} \qquad (20.4.78)$$

根据 Simonin[212],FLUENT 把离散相 p 的紊流量度写为如下形式：

$$k_p = k_q\left(\frac{b^2 + \eta_{pq}}{1 + \eta_{pq}}\right) \qquad (20.4.79)$$

$$k_{pq} = 2k_q\left(\frac{b + \eta_{pq}}{1 + \eta_{pq}}\right) \qquad (20.4.80)$$

$$D_{t,pq} = \frac{1}{3}k_{pq}\tau_{t,pq} \qquad (20.4.81)$$

$$D_p = D_{t,pq} + \left(\frac{2}{3}k_p - b\frac{1}{3}k_{pq}\right)\tau_{F,pq} \qquad (20.4.82)$$

$$b = (1 + C_V)\left(\frac{\rho_p}{\rho_q} + C_V\right)^{-1} \qquad (20.4.83)$$

$C_V = 0.5$是附加的质量系数。

相间紊流动量传递（Interphase Turbulent Momentum Transfer）

多相流的紊流曳力项（方程 20.4.9 中的$K_{pq}(\bar{v}_p - \bar{v}_q)$）模化如下，对离散相 p 和连续相q：

$$K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) = K_{pq}(\vec{U}_p - \vec{U}_q) - K_{pq}\vec{v}_{dr} \qquad (20.4.84)$$

方程 20.4.84 右边的第二项包含漂移速度：

$$\vec{v}_{dr} = -\left(\frac{D_p}{\sigma_{pq}\alpha_p}\nabla\alpha_p - \frac{D_q}{\sigma_{pq}\alpha_q}\nabla\alpha_q\right) \qquad (20.4.85)$$

这里D_p *and* D_q是扩散率，σ_{pq}是紊流 Schmidt 数。当在多相流中使用 Tchen 理论时，FLUENT 假设$D_p = D_q = D_{t,pq}$并默认σ_{pq}的值为 0.67。

在体积分数中漂移速度起因于紊流波动，当乘以交换系数K_{pq}时，它用作紊流动量交换项的

修正。默认情况，不包含这个修正，但是在问题设置过程中，你能用它。

每相的紊流模型（Turbulence Model for Each Phase）

最普通的多相紊流模型为每一相求解一套 k and ε 输运方程。当紊流传递在相间起重要作用时，这个紊流模型是合适的选择。

注：由于 FLUENT 为每个第二相求解两个附加的输运方程，每相的紊流模型比分散相紊流模型大大地增加了计算的强度。

输运方程（Transport Equations）

雷诺应力张量和紊流粘度采用方程 20.4.65 和 20.4.66 计算。紊流预测从下式获得：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q k_q)+\nabla\cdot\left(\alpha_q\rho_q\vec{U}_q k_q\right)=\nabla\cdot(\alpha_q\frac{\mu_{t,q}}{\sigma_k}\nabla k_q)+\left(\alpha_q G_{k,q}-\alpha_q\rho_q\varepsilon_q\right)+$$
$$\sum_{l=1}^{N}K_{lq}(C_{lq}k_l-C_{ql}k_q)-\sum_{l=1}^{N}K_{lq}(\vec{U}_l-\vec{U}_q)\cdot\frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l\sigma_l}\nabla\alpha_l+\sum_{l=1}^{N}K_{lq}(\vec{U}_l-\vec{U}_q)\cdot\frac{\mu_{t,q}}{\alpha_q\sigma_q}\nabla\alpha_q \quad (20.4.86)$$

和

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q\varepsilon_q)+\nabla\cdot(\alpha_q\rho_q\vec{U}_q\varepsilon_q)=\nabla\cdot(\alpha_q\frac{\mu_{t,q}}{\sigma_\varepsilon}\nabla\varepsilon_q)+\frac{\varepsilon_q}{k_q}(C_{1\varepsilon}\alpha_q G_{k,q}-C_{2\varepsilon}\alpha_q\rho_q\varepsilon_q+$$
$$C_{3\varepsilon}(\sum_{l=1}^{N}K_{lq}(C_{lq}k_l-C_{ql}k_q)-\sum_{l=1}^{N}K_{lq}(\vec{U}_l-\vec{U}_q)\cdot\frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l\sigma_l}\nabla\alpha_l+\sum_{l=1}^{N}K_{lq}(\vec{U}_l-\vec{U}_q)\cdot\frac{\mu_{t,q}}{\alpha_q\sigma_q}\nabla\alpha_q)) \quad (20.4.87)$$

C_{lq} and C_{ql} 可以近似的写为：

$$C_{lq}=2$$
$$C_{ql}=2(\frac{\eta_{lq}}{1+\eta_{lq}}) \quad (20.4.88)$$

这里 η_{lq} 由方程 20.4.78 定义。

相间紊流动量传递（Interphase Turbulent Momentum Transfer）

紊流曳力项（方程 20.4.9 中的 $K_{pq}(\vec{v}_p-\vec{v}_q)$ ）模化如下，这里 l 是分散相（代替方程 20.4.9 中的 p ），q 是连续相：

$$\sum_{l=1}^{N}K_{lq}(\vec{v}_l-\vec{v}_q)=\sum_{l=1}^{N}K_{lq}(\vec{U}_l-\vec{U}_q)-\sum_{l=1}^{N}K_{lq}\vec{v}_{\mathrm{dr},lq} \quad (20.4.89)$$

这里 $\vec{U}_l$ and $\vec{U}$ 是相加权速度，$\vec{v}_{dr,lq}$ 是相 l 的漂移速度（使用方程 20.4.85 计算，用 l 取代 p ）。

注：FLUENT 直接从输运方程计算扩散率 D_l and D_q ，而不使用 Tchen 理论（如它用于分散紊流模型）。

如上面指出的，漂移速度起因于体积分数的紊流波动。当乘以交换系数 K_{lq} 时，用于修正紊流中的动量交换项。默认情况，这个修正不包括，但是你能在问题设置过程中使用它。

FLUENT 中的每相的紊流模型解释为紊流场中一相对其它相的影响。如果你想修正或增强多相紊流场之间的相互作用和相间紊流动量的传递，你可以使用用户定义函数提供这些项。

20.4.8FLUENT 中的求解方法

对欧拉多相流计算，对压力速度耦合 FLUENT 使用 Phase Coupled SIMPLE (PC-SIMPLE)算法[244]。PC-SIMPLE 是 SIMPLE 算法[172]在多相流中的扩展。速度的求解被相耦合，但是用分离的方式。文献[260]中描述的耦合求解器采用的多重网格块代数方案用来同时地求解各相速度分量形成的矢量方程。然后，压力修正方程是基于总的体积连续而不是质量连续建立起来的。为了满足连续性的约束压力和速度都被修正。

压力修正方程（**The Pressure-Correction Equation**）

对不可压缩多相流，压力修正方程采用如下形式：

$$\sum_{k=1}^{n}\left\{\frac{\partial}{\partial t}\alpha_k + \nabla\cdot\alpha_k\vec{v}_k' + \nabla\cdot\alpha_k\vec{v}_k^* - \frac{1}{\rho_k}\sum_{l=1}^{n}\dot{m}_{lk}\right\} = 0 \qquad (20.4.90)$$

这里 $\vec{v}_k'$ 是第 k 相的速度修正，$\vec{v}_k^*$ 是 $\vec{v}_k$ 的当前迭代值。速度修正本身表示为压力修正的函数。

体积分数（**Volume Fractions**）

体积分数从相连续性方程获得。离散形式下，第 k 相体积分数方程为：

$$a_{p,k}\alpha_k = \sum_{nb}\left(a_{nb,k}\alpha_{nb,k}\right) + b_k = R_k \qquad (20.4.91)$$

为了满足所有体积分数和为 1 的条件，还有：

$$\sum_{k-1}^{n}\alpha_k = 1 \qquad (20.4.92)$$

20.5 气穴影响（Cavitation Effects）

当使用混合模型或欧拉模型时，气穴影响是被包含在两相流中的。这部分 FLUENT 中使用的关于气穴的模型。

20.5.1 气穴模型概述及其局限（Overview and Limitations of the Cavitation Model）

在恒定温度下对液体降压，可以降到饱和蒸汽压之下。在恒温下通过降低压力使液体破裂的过程称为气穴现象。液体包含微小空气泡或核，在降压下它们会长大并形成气穴。

当局部压力小于蒸发压力时，为两种互相贯穿的流体设计的气穴模型模拟了气泡的信息。气穴模型可以和混合模型（有无滑移速度）或欧拉多相模型一起使用。

气穴模型中作了如下假设：

1. 调查研究中仅涉及两相的系统。
2. 气泡既不创造也不破坏。
3. 每个单位体积内气泡的数量是预先知道的。

FLUENT 中应用气穴模型的局限如下：

1. 气穴模型不能和 VOF 模型一起使用，因为 VOF 模型的表面跟踪方案和气穴模型的相互贯穿的连续性假设是不相容的。
2. 气穴模型仅用于使用使用混合或欧拉模型的多相流模拟并且只能涉及两相。求解气穴模型使用没有滑移速度的混合模型总是可取的，如果问题建议两相之间有重大的滑移，欧

拉多相和滑移速度应打开。

3. 使用气穴模型，只能第二相是可压缩的，主相必须是不可压缩的。

体积和气泡数量（Volume and Number of Bubbles）

单个气泡体积关于空间和时间的变化由下式给出

$$\phi(\vec{r},t)=\frac{4}{3}\pi R^3 \qquad (20.5.1)$$

这里 R 是气泡的半径。

蒸发的体积分数定义为：

$$\alpha_v=\frac{\phi\eta}{1+\phi\eta} \qquad (20.5.2)$$

这里 η 是单位流体容积内的气泡数量。

体积分数方程（The Volume Fraction Equation）

体积分数方程从混合（m）的连续性方程获得。经过处理后，假定不可压缩的液体（ l ）,可以获得下面的表达式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p)+\nabla(\alpha_p\vec{v}_m)=\frac{\rho_l}{\rho_m}\frac{\eta}{(1+\eta\phi)^2}\frac{d\phi}{dt}+\frac{\alpha\rho_v}{\rho_m}\frac{d\rho_v}{dt} \qquad (20.5.3)$$

气泡动力学（Bubble Dynamics）

由于气穴气泡在低温下形成液体，FLUENT 等温模拟气穴流动，忽略了蒸发潜热。

Rayleigh-Plesset 方程与压力和气泡容积 ϕ 相关：

$$R\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{3}{2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2=\frac{p_B-p}{\rho_l}-\frac{2\sigma}{\rho_l R}-4\frac{\mu_l}{\rho_l R}\frac{dR}{dt} \qquad (20.5.4)$$

这里 p_B 表示气泡内的压力，由蒸汽的部分压力（ p_v ）和非凝结气体的部分压力（ p ）之和来描绘， σ 是表面张力系数。

为了简化计算，FLUENT 假设气泡成长和破裂的过程由下式给出：

$$\frac{dR}{dt}=\begin{cases}\sqrt{\frac{2(p_B-p)}{3\rho_l}}, & p_v>p\\ -\sqrt{\frac{2(p_B-p)}{3\rho_l}}, & p_v<p\end{cases} \qquad (20.5.5)$$

20.6 设置一般的多相流问题（Setting Up a General Multiphase Problem）

这部分提供了使用 VOF 模型，混合模型和欧拉多相流模型的用法和指南。

20.6.1 使用一般多相流模型的步骤（Steps for Using the General Multiphase Models）

设置和求解一般多相流问题的步骤的要点如下，各个子部分详细的讲述在随后的章节中。记住这里给出的仅是与一般多相流计算相关的步骤。有关你使用的其它模型和相关的多相流模型的输入的详细信息，将在这些模型中合适的部分给出。

见 Section 20.6.2 有简化欧拉多相流模拟的指南。

1．选中你想要使用的多相流模型（VOF, mixture, or Eulerian）并指定相数。对 VOF 模型，也指定 VOF 公式。

Define →Models →Multiphase...

See Sections 20.6.3 and 20.6.4 for details.
2.从材料库中复制描述每相的材料。

Define →Materials...

如果你使用的材料在库中没有，应创建一种新材料。关于从库中复制和创建新材料的详细内容见 Section 7.1.2. 关于为可压缩相(VOF and mixture models only)指定材料属性的详细内容详见 Section 20.6.16.

!!如果你的模型中含有微粒（granular）相，你必须在 *fluid* materials category 中为它创建新材料（*not* the solid materials category**.**）

3. 定义相，指定相间的相互作用（interaction）(例如，使用 OVF 模型时的表面张力（surface tension），使用混合模型时的滑流速度，使用欧拉模型时的 drag functions)

Define →Phases...

See Sections 20.6.7- 20.6.10 for details.

4.(仅对欧拉模型)如果流动是紊流，定义多相紊流模型。

Define →Models →Viscous...

See Section 20.6.13 for details.

5. 如果体积力存在，turn on gravity and specify the gravitational acceleration.

Define →Operating Conditions...

See Section 20.6.11 for details.

6. 指定边界条件，包括第二相体积份额在流动边界和（如果在 VOF 模拟中你模拟壁面附近）壁面上的接触角。

Define →Boundary Conditions...

See Section 20.6.14 for details.

7. 设置模拟具体的解参数

Solve →Controls →Solution...

See Sections 20.6.12 and 20.7 for details.

8. 初始化解和为第二相设定初始体积份额。

Solve →Initialize →Patch...

See Section 20.6.15 for details.

9. 计算求解和检查结果

See Sections 20.7 and 20.8 for details.

20.6.2 欧拉多相流模拟的附加指南（Additional Guidelines for Eulerian Multiphase Simulations）

一旦你决定了欧拉多相流模型适合你的问题（as described in Sections 18.4 and 20.1），你应当考虑求解你的多相流问题的需求计算能力。要求的计算能力很强的依赖于所求解的输运方程的个数和耦合程度。对欧拉多相流模型，有大数量的高度耦合的输运方程，计算的耗费将很高，在设置你的问题前，尽可能减少问题的 statement 到最简化的可能形式。

在你开始第一次求解尝试，取而代之尽力去求解多相流动的所有的复杂方面，你可以以简单近似地开始并且知道问题定义的最终形式。简化多相流问题的一些建议列举如下：

1. 使用六面体或四边形网格（而不用四面体或三角形网格）。
2. 减少相的数目。

你会发现即使简单的近似也会给你的问题提供有用的信息。

See Section 20.7.3 for more solution strategies for Eulerian multiphase calculations.

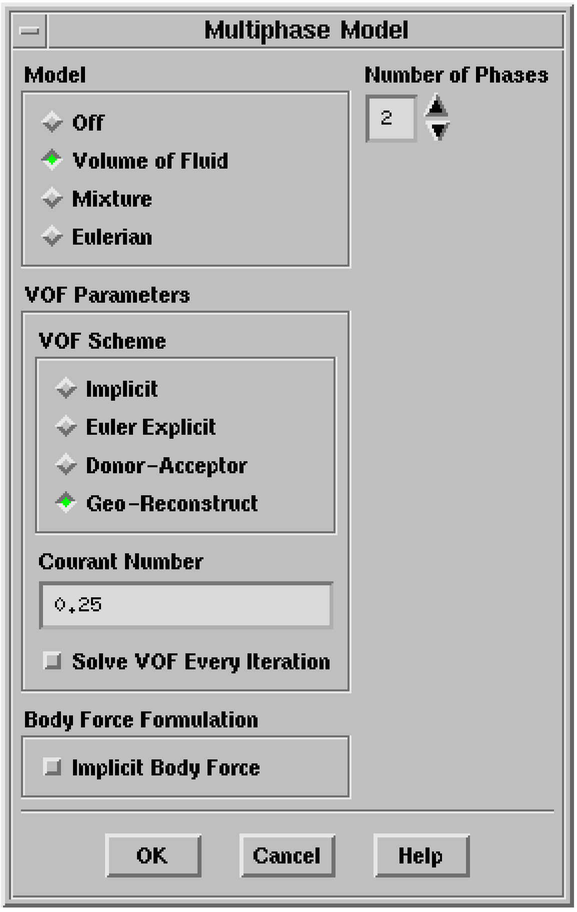
20.6.3 选用多相流模型并指定相数（Enabling the Multiphase Model and Specifying the

Number of Phases）

为了选 VOF, mixture, Eulerian 多相流模型，在 **Multiphase Model** panel (Figure 20.6.1)下选 **Volume of Fluid**, **Mixture**, or **Eulerian** as the **Model**。

Define →**Models** →**Multiphase...**

Figure 20.6.1: The **Multiphase Model** Panel



这个面板将扩展为显示已选择的多相流模型相关输入。

如果你选的是 VOF 模型，输入如下：

- number of phases
- VOF formulation (see Section 20.6.4)
- (optional) implicit body force formulation (see Section 20.6.11)

如果你选择的是混合模型，输入如下：

- number of phases
- whether or not to compute the slip velocities (see Section 20.6.5)
- (optional) implicit body force formulation (see Section 20.6.11)
- (optional) cavitation effects (see Section 20.6.6)

如果你选的欧拉模型，输入如下：

- number of phases
- (optional) cavitation effects (see Section 20.6.6)

为了给多相流计算指定相数，在 **Number of Phases** 下输入合适的值。你最多可以指定 20 相。

20.6.4 选择 VOF 公式（Selecting the VOF Formulation）

为了指定使用的 VOF 公式，在 **Multiphase Model** panel 中 **VOF Parameters** 下选择合适的 **VOF Scheme**。

FLUENT 中可用的 VOF 公式如下：

1. Time-dependent with the geometric reconstruction interpolation scheme:当 VOF 解中对时间精确的瞬态行为感兴趣时，应当选这个公式。

   为了使用这个公式，选 **Geo-Reconstruct**（default）作为 **VOF Scheme**。FLUENT 将自动为时间打开非稳态公式和一阶离散格式在 **Solver** panel.

2. Time-dependent with the donor-acceptor interpolation scheme：如果你的网格中包含很多扭曲（twisted）的 hexahedral cells，建议你使用这个公式代替 time-dependent formulation with the geometric reconstruction scheme。在这种情况下，选用 the donor-acceptor scheme 能得到更精确的结果。

   使用这个公式，选 **Donor-Acceptor** as the **VOF Scheme**。FLUENT 将自动为时间打开非稳态公式和一阶离散格式在 **Solver** panel.

3. Time-dependent with the Euler explicit interpolation scheme：由于 the donor-acceptor scheme 仅对 quadrilateral and hexahedral 网格有效，它不能用于 *hybrid* mesh containing twisted hexahedral cells。这种情况下，你应使用 the time-dependent Euler explicit scheme。这个公式也能用在 the geometric reconstruction scheme 不能给出满意结果的其它情形时，否则流动的计算变得不稳定。

   使用这个公式，select **Euler Explicit** as the **VOF Scheme**。FLUENT 将自动为时间打开非稳态公式和一阶离散格式在 **Solver** panel.

   当 the Euler explicit time-dependent formulation 比 the geometric reconstruction scheme 有更少的计算耗费时，相间的界面不在象用 the geometric reconstruction scheme 预测的一样明显。为减少这种扩散，建议为体积份额方程选用二阶离散格式。另外，为了获得更清晰的界面，在用 the implicit scheme 计算之后，你可以考虑返回来用 the geometric reconstruction scheme。

4. Time-dependent with the implicit interpolation scheme:如果你要寻找稳态解和中间的瞬态行为不感兴趣，但是最终的稳态解独立于初始流动条件/或者你不让每相有明显的 inflow boundary, 可以使用这个公式。

使用这个公式，select **Implicit** as the **VOF Scheme**, and enable an **Unsteady** calculation in the **Solver** panel (opened with the **Define/Models/Solver...** menu item).

！！ 上面为 the Euler explicit time-dependent formulation 讨论的结果也适用于 the implicit time-dependent formulation。为了提高相界面的清晰度，你应慎重考虑以上所述。

5． Steady-state with the implicit interpolation scheme：如果你要寻找稳态解和中间的瞬态行为不感兴趣，并且最终的稳态解不被初始流动条件影响而每相有明显的 inflow boundary,这个公式可以使用。

使用这个公式，select **Implicit** as the **VOF Scheme**.

！！ 上面为 Euler explicit time-dependent formulation 讨论的结果也适用于 the implicit steady-state formulation。为了提高相界面的清晰度，你应慎重考虑以上所述。

！！对于 the geometric reconstruction 和 donor-acceptor schemes，如果你使用了 conformal grid（也就是，在两个子边界相交的边界上网格节点的位置是一样（identical）的），你必须保证在这个区域内没有双边（0 厚度）壁面。如果有，你必须 split them, as described in Section 5.7.8.

例子

为了帮助为你的问题选择最好的公式，使用不同公式的例子列举如下：

1． jet breakup：time-dependent with the geometric reconstruction scheme（or the donor-acceptor or Euler explicit scheme if problems occur with the geometric reconstruction scheme）。
2． shape of the liquid interface in a centrifuge: time-dependent with the implicit interpolation scheme。
3． flow around a ship's hull: steady-state with the implicit interpolation scheme

20.6.5 定义均匀多相流（Defining a Homogeneous Multiphase Flow）

如果你使用的是混合模型，你可选择不做滑流速度的计算而求解一个均匀的多相流问题（也就是，所有相有着相同的速度），默认情形，FLUENT 会为第二相计算滑流速度，如 Section 20.3.4 所述。如果你想求解一均匀多相流问题，在 **Mixture Parameters** 下关掉 **Slip Velocity**。

20.6.6 包含气穴影响（Including Cavitation Effects）

对混合的欧拉模型计算，包含气穴影响是可能的。为了选气穴模型，在 **Multiphase Model** panel 中 **Interphase Mass Transfer** 下打开 **Cavitation**。

由于气穴影响，接下来你应指定在使用传质计算时的两个参数。这些参数的指定应当于调查下的流动特征参数相一致：Reynolds number and cavitation number。在

Multiphase Model panel 中 **Cavitation Parameters** 下面，设置 **Vaporization Pressure**（ p_v in Equation 20.5.5）和 **Bubble Number Density**（ η in Equation 20.5.2）。 η 的默认值是 10000，由 Kubota et al 推荐。默认的 p_v 值是 2367.8，环境温度下水的汽化压力。

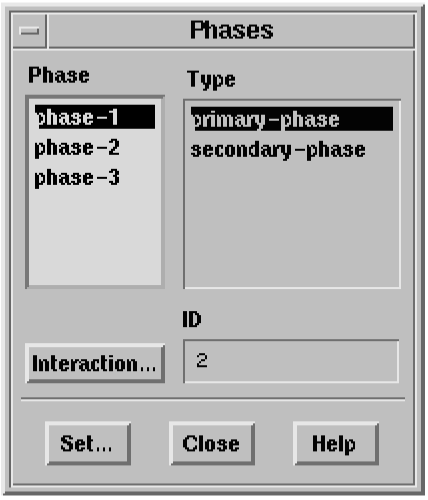
模拟气穴的详细内容见 Section 20.5。

20.6.7 定义相概述（Overview of Defining the Phases）

为了定义相（包括它们的材料属性）和相间的相互作用（例如，VOF 模型中的表面张力和壁面粘附，混合模型中的滑流速度函数，欧拉模型中的曳力函数），你将使用 **Phases** panel (Figure 20.6.2).

Define → Phases...

Figure 20.6.2: The **Phases** Panel



这个面板中 **Phase** 下的每一项两类之一，如在 Type 列表中所示：**primary-phase** 指出了所选项是主相，**secondary-phase** 指出所选项是第二相。指定相之间的相互作用，点击 **Interaction...** button.。

为 VOF 模型、混合模型、欧拉模型定义相及其相互作用的说明由 Sections 20.6.8, 20.6.9 和 20.6.10 分别给出。

20.6.8 为 VOF 模型定义相（Defining Phases for the VOF Model）

在 VOF 计算中为主相和第二相指定必要的信息和它们的相互作用的说明由下面给出。

!! 通常，你可以你喜欢的任何方式指定主相和第二相。考虑你的选择如何影响问题的设置是一种很好的主意，特别是在复杂的问题中。例如，对区域一部分中的一相，

如果你计划 patch 其初始体积份额为 1，指定这个相为第二相更方便。同样，如果一相是可压缩的，为了提高解的稳定性，建议你指定它为主相。

!! 记住，只能有一相是可压缩的。确定你没有选择可压缩材料（也就是对密度使用可压缩理想气体定律的材料）为多于一相的。See Section 20.6.16 for details.

Defining the Primary Phase

按以下步骤为 VOF 计算定义主相：

1. Select **phase-1** in the **Phase** list.
2. Click **Set...**, and the **Primary Phase** panel (Figure 20.6.3) will open.

Figure 20.6.3: The **Primary Phase** Panel



3. In the **Primary Phase** panel, enter a **Name** for the phase.
4. Specify which material the phase contains by choosing the appropriate material in the **Phase Material** drop-down list.
5. Define the material properties for the **Phase Material**.
   (a) Click **Edit...**, and the **Material** panel will open.
   (b) In the **Material** panel, check the properties, and modify them if necessary. (See Chapter 7 for general information about setting material properties, Section 20.6.16 for specific information related to compressible VOF calculations, and Section 20.6.17 for specific information related to melting/solidification VOF calculations.)

!! If you make changes to the properties, remember to click **Change** before closing the **Material** panel.

6. Click **OK** in the **Primary Phase** panel.

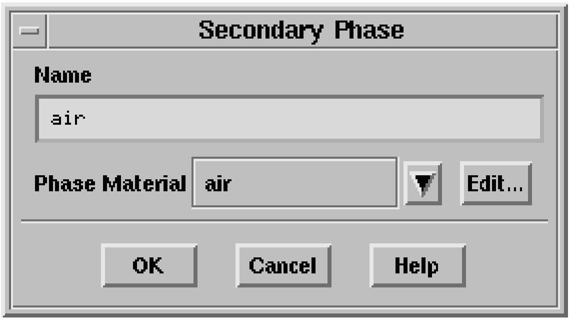
Defining a Secondary Phase

按以下步骤为 VOF 计算指定第二相：

1. Select the phase (e.g., **phase-2**) in the **Phase** list.

2.Click **Set...**, and the **Secondary Phase** panel (Figure 20.6.4) will open.

Figure 20.6.4: The **Secondary Phase** Panel for the VOF Model



3. In the **Secondary Phase** panel, enter a **Name** for the phase.

4. Specify which material the phase contains by choosing the appropriate material in the **Phase Material** drop-down list.

5. Define the material properties for the **Phase Material**, following the procedure outlined above for setting the material properties for the primary phase.

6. Click **OK** in the **Secondary Phase** panel.

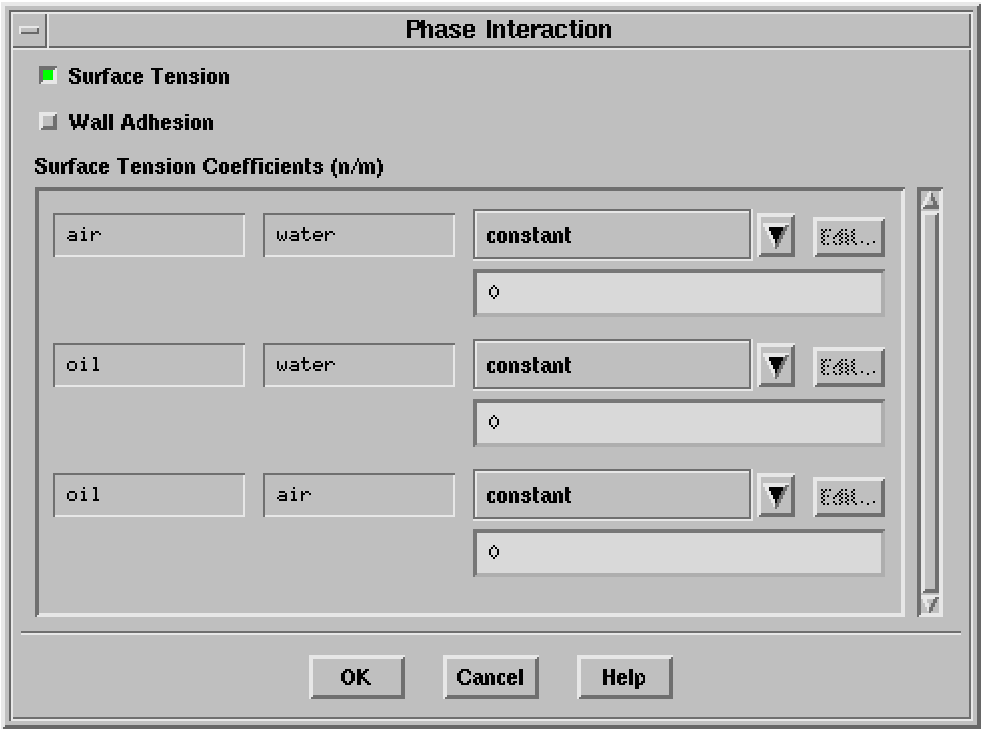
Including Surface Tension and Wall Adhesion Effects

如在 Section 20.2.8 中讨论的，表面张力影响的重要性取决于毛细管数 Ca(defined by Equation 20.2-16)的值，或者 Weber number ,We(defined by Equation 20.2-17).如果 Ca>>1 或者 We<<1，表面张力的影响可以忽略。

!! 注意如果你在表面张力有重大影响的计算区域内使用四边形或六边形网格，表面张力影响的计算会更精确。如果你在整个区域内不使用四边形或六边形网格，那么你应当使用在影响区域内用四边形或六边形的混合网格。

如果你想包含沿着一对或多对相的界面上的表面张力的影响，如在 Section 20.2.8 中述的，点击 **Interaction...** to open the **Phase Interaction** panel (Figure 20.6.5)**.**

Figure 20.6.5: The **Phase Interaction** Panel for the VOF Model



包含沿着一对或多对相界面上表面张力（and, if appropriate, wall adhesion)）的影响，遵循以下步骤：

1. Turn on the **Surface Tension** option.
2. 如果你想包含壁面黏附的，turn on the **Wall Adhesion** option. (When **Wall Adhesion** is enabled, you will need to specify the contact angle at each wall as a boundary condition (as described in Section 20.6.14.)
3. 对于你想包含表面张力影响的每一对相，指定一个常数表面张力系数。默认情况，所有表面张力系数都为零，表示沿着两相界面上没有表面张力。

!! 对于涉及到表面张力的计算，建议你在 **Multiphase Model** panel 中为 **Body Force Formulation** 打开 **Implicit Body Force**。这样做由于压力梯度和动量方程中表面张力的部分平衡，从而提高了解的收敛性。详细内容见 Section 22.3.3.

20.6.9 定义混合模型中的相（Defining Phases for the Mixture Model）

在混合模型计算中为主相和第二相指定必要的信息和它们的相互作用的说明由下面给出。

!!记住，只能有一相是可压缩的。确定你没有选择可压缩材料（也就是对密度使用可压缩理想气体定律的材料）为多于一相的。See Section 20.6.16 for details.

Defining the Primary Phase

在混合模型计算中定义主相的步骤与在 VOF 计算中相同。详细内容见 Section 20.6.8.

Defining a Secondary Phase

在混合模型计算中定义第二相的步骤如下：

1. Select the phase (e.g., **phase-2**) in the **Phase** list.
2. Click **Set...**, and the **Secondary Phase** panel (Figure 20.6.6) will open.

Figure 20.6.6: The **Secondary Phase** Panel for the Mixture Model

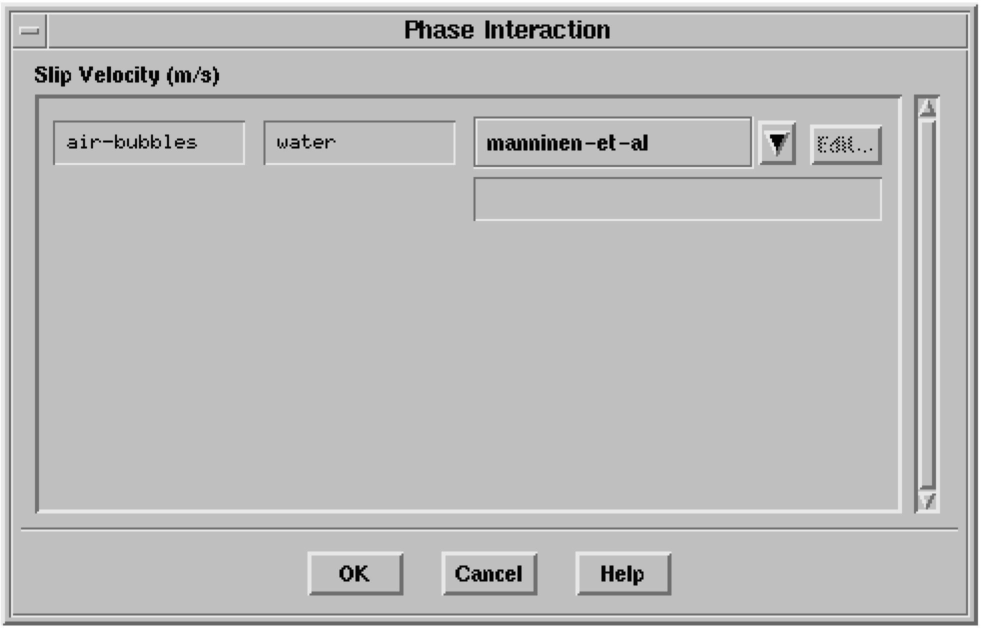


3. In the **Secondary Phase** panel, enter a **Name** for the phase.
4. Specify which material the phase contains by choosing the appropriate material in the **Phase Material** drop-down list.
5. Define the material properties for the **Phase Material**, following the same procedure you used to set the material properties for the primary phase (see Section 20.6.8). For a particulate phase (which must be placed in the fluid materials category, as mentioned in Section 20.6.1), you need to specify only the density; you can ignore the values for the other properties, since they will not be used.
6. In the **Secondary Phase** panel, specify the **Diameter** of the bubbles, droplets, or particles of this phase (d_p in Equation 20.3-12). You can specify a constant value, or use a user-defined function. See the separate UDF Manual for details about user-defined functions.
7. Click **OK** in the **Secondary Phase** panel.

Defining the Slip Velocity

如果你在混合计算中要求解滑流速度，你想指定滑流速度的定义，click **Interaction...** to open the **Phase Interaction** panel (Figure 20.6.7).

Figure 20.6.7: The **Phase Interaction** Panel for the Mixture Model



在 **Slip Velocity** 下面，你可以通过在附近下拉列表中选择合适的项目给与主相相关的第二相指定滑流速度函数。

1． Select **maninnen-et-al** (the default) to use the algebraic slip method of Manninen et al. [150], described in Section 20.3.4**.**
2． Select **none** if the secondary phase has the same velocity as the primary phase (i.e., no slip velocity).
3． Select **user-defined** to use a user-defined function for the slip velocity. See the separate UDF Manual for details.

20.6.10 定义欧拉模型中的相（Defining Phases for the Eulerian Model）

在欧拉多相流计算中为主相和第二相指定必要的信息和它们的相互作用的说明由下面给出。

Defining the Primary Phase

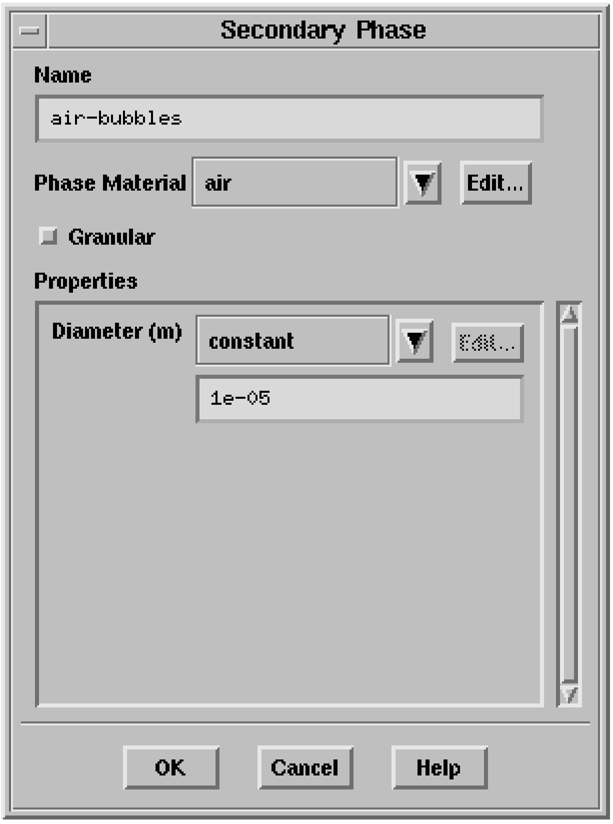
在欧拉多相流计算中定义主相的步骤与在 VOF 计算中相同。详细内容见 Section 20.6.8.

Defining a Non-Granular Secondary Phase

在欧拉多相流计算中定义非颗粒（即液体或气体）第二相的步骤如下：

1． Select the phase (e.g., **phase-2**) in the **Phase** list.
2． Click **Set...**, and the **Secondary Phase** panel (Figure 20.6.8) will open.

Figure 20.6.8: The **Secondary Phase** Panel for a Non-Granular Phase



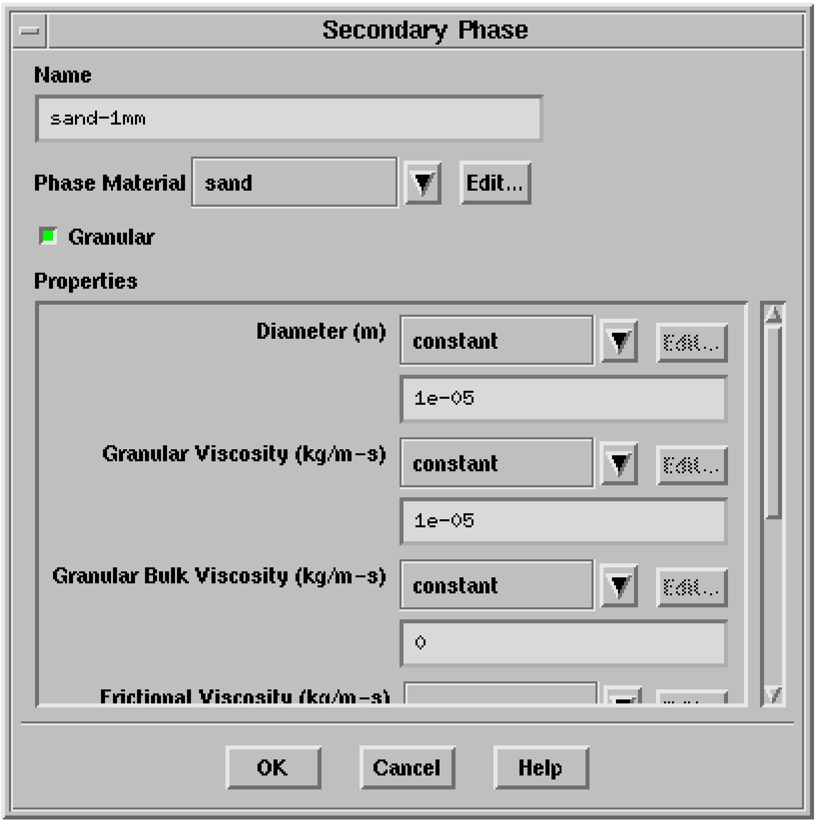
3. In the **Secondary Phase** panel, enter a **Name** for the phase.
4. Specify which material the phase contains by choosing the appropriate material in the **Phase Material** drop-down list.
5. Define the material properties for the **Phase Material**, following the same procedure you used to set the material properties for the primary phase (see Section 20.6.8).
6. In the **Secondary Phase** panel, specify the **Diameter** of the bubbles or droplets of this phase. You can specify a constant value, or use a user-defined function. See the separate UDF Manual for details about user-defined functions.
7. Click **OK** in the **Secondary Phase** panel.

Defining a Granular Secondary Phase

在欧拉多相流计算中定义颗粒第二相的步骤如下：

1. Select the phase (e.g., **phase-2**) in the **Phase** list.
2. Click **Set...**, and the **Secondary Phase** panel (Figure 20.6.9) will open.

Figure 20.6.9: The **Secondary Phase** Panel for a Granular Phase



3. In the **Secondary Phase** panel, enter a **Name** for the phase.
4. Specify which material the phase contains by choosing the appropriate material in the **Phase Material** drop-down list.
5. Define the material properties for the **Phase Material**, following the same procedure you used granular phase (which must be placed in the fluid ma to set the material properties for the primary phase (see Section 20.6.8). For a terials category, as mentioned in Section 20.6.1), you need to specify only the density; you can ignore the values for the other properties, since they will not be used.
6. In the **Secondary Phase** panel, specify the following properties of the particles of this phase:

Diameter

指定颗粒的直径。 You can select **constant** in the drop-down list and specify a constant value, or select **user-defined** to use a user-defined function. See the separate UDF Manual for details about user-defined functions.

Granular Viscosity

指定颗粒的颗粒粘度的运动部分（$\mu_{s,kin}$ in Equation 20.4-50）。You can select **constant** (the default) in the drop-down list and specify a constant value, select **Syamlal-obrien** to compute the value using Equation 20.4-52, select **gidaspow** to compute the value using Equation 20.4-53, or select **user-defined** to use a user-defined function.

Granular Bulk Viscosity

specifies the solids bulk viscosity (λ_q in Equation 20.4-8). You can select **constant**

(the default) in the drop-down list and specify a constant value, select **lun-et-al** to compute the value using Equation 20.4-54, or select **user-defined** to use a user-defined function.

Frictional Viscosity

specifies a shear viscosity based on the viscous-plastic flow ($\mu_{s,fr}$ in Equation 20.4-50).

By **none** in the drop-down list. If you want to include the fric default, the frictional viscosity is neglected, as indicated by the default selection of tional viscosity, you can select Equation **constant** and specify a constant value, select **schaeffer** to compute the value using 20.4-55, or select **user-defined** to use a user-defined function.

Angle of Internal Friction

specifies a constant value for the angle ϕ used in Schaeffer's expression for frictional viscosity (Equation 20.4-55). This parameter is relevant only if you have selected **schaeffer** or **user-defined** for the **Frictional Viscosity**.

Packing Limit

specifies the maximum volume fraction for the granular phase ($\alpha_{s,\max}$). For monodispersed spheres the packing limit is about 0.63, which is the default value in **FLUENT**. In polydispersed cases, however, smaller spheres can fill the small gaps between larger spheres, so you may need to increase the maximum packing limit.

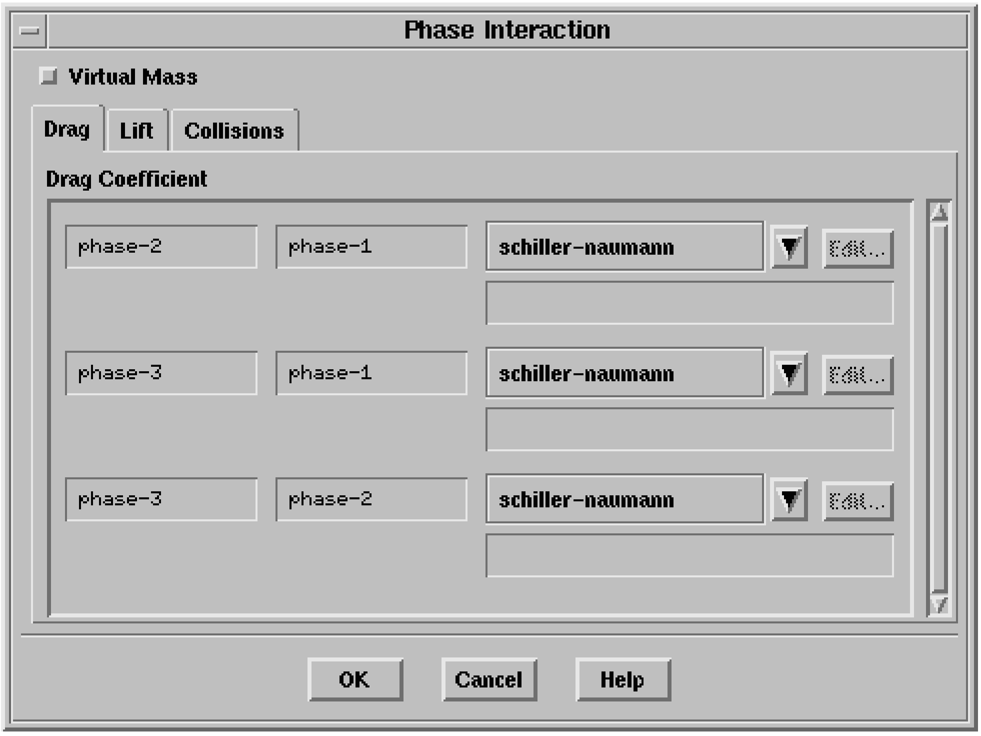
7. Click **OK** in the **Secondary Phase** panel.

Defining the Interaction Between Phases

对颗粒和非颗粒流动，你必须指定在动量交换系数的计算中使用的曳力函数。对颗粒流，你也必须指定颗粒碰撞的归还系数（restitution coefficients）。为颗粒和非颗粒流动包含可选的升力和虚拟质量力（下面描述）也是可能的。

为指定这些参数，click **Interaction...** to open the **Phase Interaction** panel (Figure 20.6.10).

Figure 20.6.10: The **Phase Interaction** Panel for the Eulerian Model



Specifying the Drag Function

FLUENT 允许你为一对相指定曳力函数，步骤如下：

1．Click the **Drag** tab to display the **Drag Function** inputs.

2. 对每一对相，从下面相应的列表中选择合适的曳力函数。

（1） Select **schiller-naumann** to use the fluid-fluid drag function described by Equation 20.4-19. The Schiller and Naumann model is the default method, and it is acceptable for general use in all fluid-fluid multiphase calculations.

（2） Select **morsi-alexander** to use the fluid-fluid drag function described by Equation 20.4-23. The Morsi and Alexander model is the most complete, adjusting the function definition frequently over a large range of Reynolds numbers, but calculations with this model may be less stable than with the other models.

（3） Select **symmetric** to use the fluid-fluid drag function described by Equation 20.4-28. The symmetric model is recommended for flows in which the secondary (dispersed) phase in one region of the domain becomes the primary (continuous) phase in another. For example, if air is injected into the bottom of a container filled halfway with water, the air is the dispersed phase in the bottom half of the container; in the top half of the container, the air is the continuous phase.

（4） Select **wen-yu** to use the fluid-solid drag function described by Equation 20.4-40. The Wen and Yu model is applicable for dilute phase flows, in which the total secondary phase volume fraction is significantly lower than that of the primary phase.

（5） Select **gidaspow** to use the fluid-solid drag function described by Equation 20.4-42. The Gidaspow model is recommended for dense fluidized beds.

（6） Select **syamlal-obrien** to use the fluid-solid drag function described by Equation 20.4-32. The Syamlal-O'Brien model is recommended for use in

conjunction with the Syamlal-O'Brien model for granular viscosity.

（7） Select **syamlal-obrien-symmetric** to use the solid-solid drag function described by Equation 20.4-44. The symmetric Syamlal-O'Brien model is appropriate for a pair of solid phases.

（8） Select **constant** to specify a constant value for the drag function, and then specify the value in the text field.

（9） Select **user-defined** to use a user-defined function for the drag function (see the separate UDF Manual for details).

（10） If you want to temporarily ignore the interaction between two phases, select **none**.

Specifying the Restitution Coefficients (Granular Flow Only)

对颗粒流，你必须为颗粒间的碰撞指定归还系数（e_{ls} in Equation 20.4-44 and e_{ss} in Equation 20.4-45）。除了为每一对颗粒相之间的碰撞指定归还系数外，你也得为同相颗粒之间的碰撞指定归还系数。

步骤如下：

1．Click the **Collisions** tab to display the **Restitution Coefficient** inputs.

2．For each pair of phases, specify a constant restitution coefficient. All restitution coefficients are equal to 0.9 by default.

Including the Lift Force

对颗粒和非颗粒流，在第二相颗粒、液滴、或气泡中包含升力（F_{lift} in Equation 20.4-10）的影响是可能的。这些升力作用于颗粒、液滴或气泡主要是由于主相流场中的速度梯度。在大多数情形下，升力与曳力相比是不重要的，因此没必要包含它，如果升力重要（也就是说，如果相很快分离），你可以包含这个影响。

!!注意对大颗粒，升力更重要，但是 FLUENT 模型假设粒子直径远小于粒子间距离。这样对接近充满的颗粒（closely packed particles）或者小颗粒，包含升力是不合适的。

包含升力影响的步骤如下：

1．Click the **Lift** tab to display the **Lift Coefficient** inputs.

2．对每一对相，从下面相应的列表中选择合适的指定方法。注意，既然作用于颗粒、液滴或气泡的升力主要是由于主相流场中的速度梯度，你不必为存在于两个第二相间的每对相指定升力系数；只对存在于第二相和主相之间的每对相指定升力系数。

（1） Select **none** (the default) to ignore the effect of lift forces.

（2） Select **constant** to specify a constant lift coefficient, and then specify the value in the text field.

（3） Select **user-defined** to use a user-defined function for the lift coefficient (see the separate UDF Manual for details).

Including the Virtual Mass Force

对颗粒和非颗粒流，当第二相相对于主相加速时包含存在的虚拟质量力（F_{vm} in Equation20.4-11）是可能的。当第二相的密度远小于主相的密度时虚拟质量的影响是重要的（也就是对瞬态泡状柱流（transient bubble column））。

包含虚拟质量力的影响，turn on the **Virtual Mass** option in the **Phase Interaction** panel.

虚拟质量力的影响被包含在所有第二相内；使它仅为颗粒相是不可能的。

20.6.11 Including Body Force(包含体积力)

在许多情况下，相的运动部分是由于重力的影响。为了包含这个体积力，应在 **Operating Conditions panel** 下选择 **Gravity** 并且指定 **Gravitational Acceleration.**

Define →Operating Conditions...

对于 VOF 计算，你应当在 Operating Conditions panel 下选择 Specified Operating Density,并且在 Operating Density 下为最轻相设置密度。（这种排除了水力静压的积累，提高了 round-off 精度为动量平衡）。如果任何一相都是可压缩的，设置 Operating Density 为零。

！！对于涉及体积力的 VOF 和 mixture 计算，建议你在 Multiphase Model panel 下为 Body Force Formulation 选择 Implicit Body Force.这种处理通过解决压力梯度和动量方程中体积力的部分平衡提高了解的收敛。

20.6.12 为 VOF 模型设置时间依赖参数

在 FLUENT 中，如果你使用依赖时间的 VOF 公式，volume fraction 的一个隐式解或者在每一个时间补或者在每一迭代次数上获得，主要取决你输入的模型。你也可以控制时间步用于 volume fraction 的计算。

计算一个依赖时间的 VOF 解，你必须在 Solver 面板下选择 Unsteady(选择合适的 Unsteady Formulation, as discussed in section 22.15.1)。如果你选择了 **Geo-Reconstruct, Donor-Acceptor, or Euler Explicit** 格式。FLUENT 将自动为你打开 first-order 不稳态公式，因此你自己不必再访问 **Solver** 面板。

Define →Models →Solver...

在 Multiphase Model 面板中，对于时间依赖的计算有两种输入：

★ 默认情形，FLUENT 将求解 volume fraction 方程一次在每一时间步上。这意味着出现在其他输运方程中的对流流量系数不必在每一迭代层次上完全更新，因为 volume fraction field 在两次迭代之间不改变。

  如果你想让 FLUENT 在一个时间步的每一迭代步上求解一次 volume fraction equation,应在 VOF Parameters 打开 Solve VOF Every Iteration。当 FLUENT 每次迭代是求解这些方程时，其他输运方程的对流流量系数将会在基于每次迭代更新 volume fraction 的基础上更新。

  通常，当其他流动变量在每一时间步收敛时如果你预计接触面的位置将发生变化，你应当选择 Solve VOF Every Iteration. 例如，当采用大的时间步长并希望达到稳态解，这种情形就会发生。如果采用小的时间步长，在每一迭代上执行求解 volume fraction 的额外的工作是不必要的。因此你可以让这些选项关闭。在两种选择中这种更可靠，并且在每一时间步上需要更少的计算付出与第一中选择相比。

！！如果你使用的是滑动网格（sliding meshes），使用 Solve VOF Every Iteration 会得到精度更高的结果，但是得付出更多的计算代价。

★ 当 FLUENT 执行时间依赖的 VOF 计算，用于 volume fraction 计算的时间步长不必和用于其他输运方程的时间步长相同。 FLUENT 将会自动地为 VOF 调整时间步长，基于你为靠近自由表面输入的允许的最大 Courant Number. Courant Number 是一个无量纲数，它是与计算流体单元通过控制容积的时间特性的时间步长的比值：$\frac{\Delta t}{\Delta x_{cell}/v_{fluid}}$

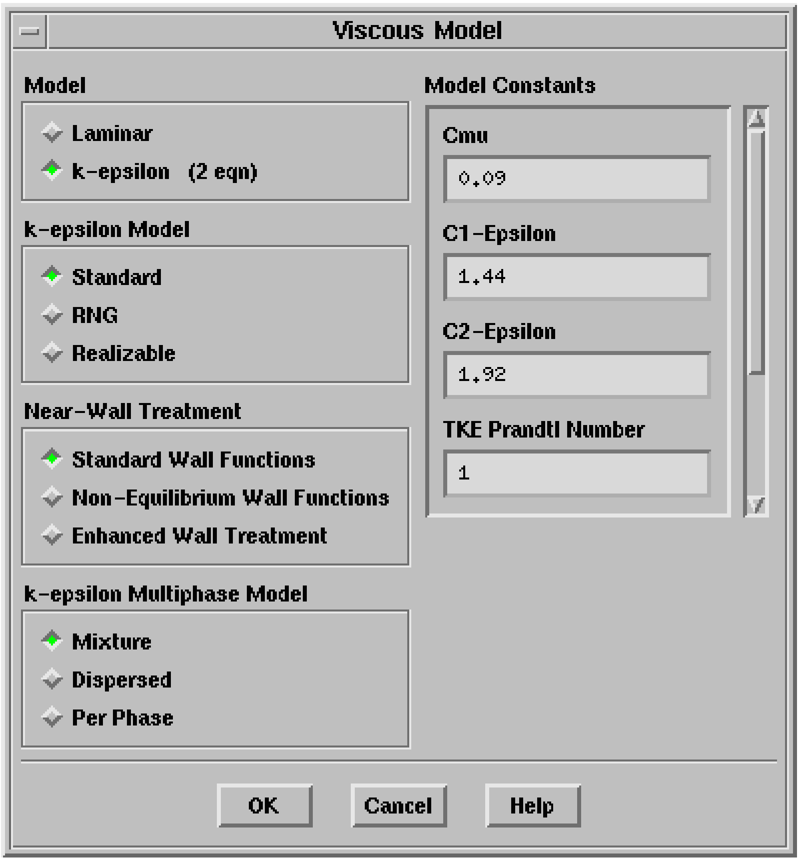
在流体接触面附近的区域，FLUENT 通过外出流量的和分开各个单元的控制容积。作为结果的时间代表了流体流出控制单元变为空所用的时间。这些时间中最小的作为流体单元通过控制容积的特性时间，如上所述。基于这个时间和你输入的允许的最大的 Courant Number, 在使用 VOF 计算时时间步被计算出来。例如，如果最大允许的 Courant number 是 0.25（默认），时间步长将会至多被选为任何靠近接触面的的最小通过时间的四分之一。

注：当采用隐式的求解方案时，这些输入是不要求的。

20.6.13 为 Eulerian 多相流计算选择紊流模型

如果你使用 Eulerian 模型求解紊流，你必须在 section 20.4.7 描述的三种紊流模型中选择一种模型（在 Viscous Model panel, Figure 20.6.11）。

Figure 20.6.11: The **Viscous Model** Panel for an Eulerian Multiphase Calculation



步骤如下：

1. Select **k-epsilon** under **Model**.
2. Select the desired **k-epsilon Model** and any other related parameters, as described for single-phase calculations in Section 10.10.
3. Under **k-epsilon Multiphase Model**, indicate the desired multiphase turbulence model (see Section 20.4.7 for details about each):
   - Select **Mixture** to use the mixture turbulence model. This is the default model.
   - Select **Dispersed** to use the dispersed turbulence model. This model is applicable when there is clearly one primary continuous phase and the rest are dispersed dilute secondary phases.
   - Select **Per Phase** to use a *k*- ϵ turbulence model for each phase. This model is appropriate when the turbulence transfer among the phases plays a dominant role

包含源项（Including Source Terms）

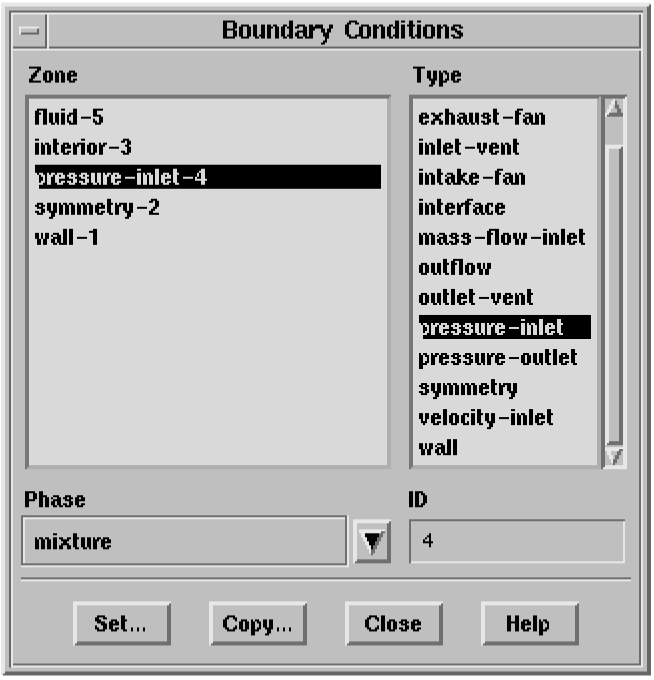
默认情形，相间动量，κ、ε 源项不包含在计算中。如果你想包含这些源项中的任一项，你可以使用 multiphase-options command in the define/models/viscous/multiphase-turbulence/ text menu。注意：包含这些项明显减慢收敛速度。如果你要寻找额外的精度，你应首先求的没有这些源项的解，接着包含上这些源项计算。大多数情形下这些源项可以忽略。

20.6.14 设置边界条件

多相流边界条件的设置在 Boundary Conditions panel (Figure 20.6.12)中进行，但是设置多相流边界条件的步骤与单相流模型有些不同。你必须分别为各个相设置一些条件，而其他的条件是所有相（也就是 mixture）所共享的，如下有详细的描述。

Define Boundary Conditions...

Figure 20.6.12: The **Boundary Conditions** Panel



混合相（mixture）和各个单相的边界条件

你必须为混合相指定的条件和你必须为单相指定的条件取决于你使用的三个多相流模型。每一个模型的详细叙述如下。

VOF 模型

如果你使用的是 VOF 模型，你必须为每一类型的区域指定的边界条件列举如下并总结在表 20.6.1 中。

- ★ 对于 exhaust fan, inlet vent, intake fan, mass flow inlet, outlet vent, pressure outlet, or velocity inlet 这些类型，没有为主相指定的条件。对于每一个的第二相，你必须设置 *volume fraction* 为常数，型线分布(见 section 6.25) 或者用户定义函数（见 UDF 手册）。所有的其他条件都是为混合相指定的。
- ★ 对于 axis, fan, outflow, periodic, porous jump, radiator, solid, symmetry, or wall zone，所有的条件都是为混合相指定的；没有为单相指定的条件。
- ★ 对于 fluid zone, mass sources 是为单相指定的，其他的所有 sources 都是为混合相指定的。

如果 fluid zone 不是多孔的，所有其他条件都是为混合相指定。

如果 fluid zone 是多孔的，你应为混合相选择 **Porous Zone** 在 **Fluid** 面板下。Porosity inputs(if relevant)也是为混合相指定的。而 Resistance coefficients 和 direction vectors 分别为每一相指定。见 section 6.19.6 看关于这些输入的详细内容。所有其他条件都是为混合相指定的。

Table 20.6.1: Phase-Specific and Mixture Conditions for the VOF Model

Type	Primary Phase	Secondary Phase	Mixture
exhaust fan	nothing	volume fraction	all others
inlet vent			
intake fan			
mass flow inlet			
outlet vent			
pressure inlet			
pressure outlet			
velocity inlet			
axis	nothing	nothing	all others
fan			
outflow			
periodic			
porous jump			
radiator			

solid			
symmetry			
wall			
pressure far-field	not available	not available	not available
fluid	mass source;	mass source;	porous zone;
	other porous	other porous	porosity;
	inputs	inputs	all others

Mixture 模型

如果你使用的是 Mixture 模型，你必须为每一类型的区域指定的边界条件列举如下并总结在表 20.6.2 中。

★ 对于 exhaust fan, outlet vent, or pressure outlet, 没有条件为混合相指定。对于每一个第二相，你必须设置 *volume fraction* 为常数，型线分布(见 section 6.25) 或者用户定义函数（见 UDF 手册）。所有的其他条件都是为混合相指定的。

★ 对于 **inlet vent, intake fan, mass flow inlet, or pressure inlet,** 你将为混合相指定描述方向的方法在这些边界中（**Normal to Boundary** or **Direction Vector**）。如果你选择 **Direction Vector** 描述方法，你将指定坐标系统（3D only）和每一相在流动方向的分量。对于每一个第二相，你必须设置 *Volume fraction* (如上面所述)。所有其他的条件都是为混合相指定。

★ 对于 **axis, fan, outflow, periodic jump, radiator, solid, symmetry, or wall zone,** 所有条件都是为混合相指定；没有条件为单相设置。

★ 对于 **fluid zone, mass sources**，是为单相指定的，其他所有 **sources** 都是为混合相指定的。

如果 fluid zone 不是多孔的，所有其他条件都为混合相指定。

如果 fluid zone 是多孔的，你将为**混合相**选择 **Porous Zone** 在 **Fluid** 面板下。Porosity inputs(if relevant)也是为混合相指定的。而 Resistance coefficients 和 direction vectors 分别为每一相指定。见 section 6.19.6 看关于这些输入的详细内容。所有其他条件都是为混合相指定的。

见 chapter 6 看关于每一类型边界条件的详细描述。注：pressure far-field 在使用 Mixture 模型时是无效的。

Table 20.6.2: Phase-Specific and Mixture Conditions for the Mixture Model

Type	Primary Phase	Secondary Phase	Mixture
exhaust fan	nothing	volume fraction	all others
outlet vent			
pressure outlet			
inlet vent	coord. system;	coord. system;	dir. spec.

intake fan	flow direction	flow direction;	method;
mass flow inlet		volume fraction	all others
pressure inlet			
velocity inlet	velocity	velocity;	all others
		volume fraction	
axis	nothing	nothing	all others
fan			
outflow			
periodic			
porous jump			
radiator			
solid			
symmetry			
wall			
pressure far-field	not available	not available	not available
fluid	mass source;	mass source;	porous zone;
	other porous	other porous	porosity;
	inputs	inputs	all others

Eulerian 模型

如果你使用的是 Eulerian 模型，你必须为每一个区域类型指定的条件列举如下并总结在表 20.6.3, 20.6.4, 20.6.5 和 20.6.6。注：具体的紊流参数取决于你使用的三个多相紊流模型，说明在表 20.6.4-20.6.6 中。见 section 20.4.7 和 20.6.13 看关于多相紊流模型的更多信息。

★ 对于 exhaust fan, outlet vent, or pressure outlet, 如果你使用层流模型或使用混合紊流模型（默认的多相紊流模型），没有条件为主相设置。

对于每个第二相，你必须设置 volume fraction 为常数，型线或者 UDF。如果相是颗粒的(granular),你也必须设置颗粒温度(granular tempreture).

如果你使用的混合紊流模型，你必须为 mixture 指定紊流边界条件；如果你使用的是分散（dispersed）紊流模型，你必须为主相设置它们；如果你使用的是 per-phase 紊流模型，你必须为主相和第二相设置它们。

所有其他条件都是为 mixture 设置的。

★ 对于 velocity inlet, 你必须为每一相指定速度。

对于第二相，你必须设置 volume fraction(如上所述)。如果相是颗粒的（granular)，你也必须设置颗粒温度（granular temperature）.

如果你使用的是 mixture 紊流模型，你必须为 mixture 设置紊流边界条件；如果你使用的是分散（dispersed）紊流模型，你必须为主相指定它们；如果你使

用的是 per-phase 紊流模型，你必须为主相和第二相设置它们。

所有其他的条件都是为 mixture 设置的。

★ 对于 axis, outflow, periodic, solid, or symmetry zone, 所有条件都是为 mixture 设置的；没有条件为单相设置。

★ 对于 wall zone, shear 条件为单相指定；所有其他条件为 mixture 指定。

★ 对于 fluid zone, 所有 source terms 和 fixed values 都是为单相设置的，除非你使用的是 mixture 紊流模型或 dispersed 紊流模型。如果你使用的是 mixture 紊流模型，紊流的 source terms 和 fixed values 为 mixture 设置；如果你使用的是 dispersed 紊流模型，他们只为主相设置。

如果 fluid zone 不是多孔的，所有其他条件都是为 mixture 设置。

如果 fluid zone 是多孔的，你将为**混合相**选择 **Porous Zone** 在 **Fluid** 面板下。Porosity inputs(if relevant)也是为混合相指定的。而 Resistance coefficients 和 direction vectors 分别为每一相指定。见 section 6.19.6 看关于这些输入的详细内容。所有其他条件都是为混合相指定的。

见 chapter 6 看关于每一类型边界条件的详细描述。注：pressure far-field，fan, porous jump and radiator 边界在使用 Eulerian 模型时是无效的。

Table 20.6.3: Phase-Specific and Mixture Conditions for the Eulerian Model (for Laminar Flow)

Type	Primary Phase	Secondary Phase	Mixture
exhaust fan	nothing	volume fraction;	all others
outlet vent		gran. temperature	
pressure outlet			
inlet vent	coord. system;	coord. system;	dir. spec.
intake fan	flow direction	flow direction;	method;
mass flow inlet		volume fraction;	all others
pressure inlet		gran. temperature	
velocity inlet	velocity	velocity;	all others
		volume fraction;	
		gran. temperature	
axis	nothing	nothing	all others
outflow			
periodic			
solid			
symmetry			
wall	shear condition	shear condition	all others

pressure far-field	not available	not available	not available
fan			
porous jump			
radiator			
fluid	all source terms;	all source terms;	porous zone;
	all fixed values;	all fixed values;	porosity;
	other porous	other porous	all others
	inputs	inputs	

Table 20.6.4: Phase-Specific and Mixture Conditions for the Eulerian Model (with the Mixture Turbulence Model)

Type	Primary Phase	Secondary Phase	Mixture
exhaust fan	nothing	volume fraction;	all others
outlet vent		gran. temperature	
pressure outlet			
inlet vent	coord. system;	coord. system;	dir. spec.
intake fan	flow direction	flow direction;	method;
mass flow inlet		volume fraction;	all others
pressure inlet		gran. temperature	
velocity inlet	velocity	velocity;	all others
		volume fraction;	
		gran. temperature	
axis	nothing	nothing	all others
outflow			
periodic			
solid			
symmetry			

wall	shear condition	shear condition	all others
pressure far-field	not available	not available	not available
fan			
porous jump			
radiator			
fluid	other source	other source	source terms
	terms;	terms;	for turbulence;
	other fixed	other fixed	fixed values
	values;	values;	for turbulence;
	other porous	other porous	porous zone;
	inputs	inputs	porosity;
			all others

Table 20.6.5: Phase-Specific and Mixture Conditions for the Eulerian Model (with the Dispersed Turbulence Model)

Type	Primary Phase	Secondary Phase	Mixture
exhaust fan	turb. parameters	volume fraction;	all others
outlet vent		gran. temperature	
pressure outlet			
inlet vent	coord. system;	coord. system;	dir. spec.
intake fan	flow direction;	flow direction;	method
mass flow inlet	turb. parameters;	volume fraction;	all others
pressure inlet		gran. temperature	
velocity inlet	velocity;	velocity;	all others
	turb. parameters	volume fraction;	
		gran. temperature	
axis	nothing	nothing	all others

outflow			
periodic			
solid			
symmetry			
wall	shear condition	shear condition	all others
pressure far-field	not available	not available	not available
fan			
porous jump			
radiator			
fluid	momentum, mass,	momentum and	porous zone;
	turb. sources;	mass sources;	porosity;
	momentum, mass,	momentum and	all others
	turb. fixed values;	mass fixed values;	
	other porous	other porous	
	inputs	inputs	

Table 20.6.6: Phase-Specific and Mixture Conditions for the Eulerian Model (with the Per-Phase Turbulence Model)

Type	**Primary Phase**	**Secondary Phase**	**Mixture**
exhaust fan	turb. parameters	volume fraction;	all others
outlet vent		turb. parameters;	
pressure outlet		gran. temperature	
inlet vent	coord. system;	coord. system;	dir. spec.
intake fan	flow direction;	flow direction;	method;
mass flow inlet	turb. parameters	volume fraction;	all others
pressure inlet		turb. parameters;	
		gran. temperature	

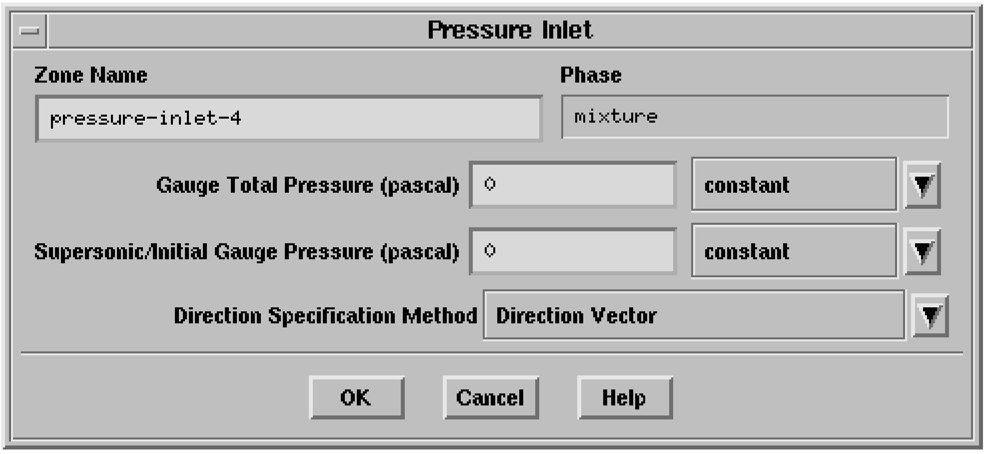
velocity inlet	velocity;	velocity;	all others
	turb. parameters	volume fraction;	
		turb. parameters;	
		gran. temperature	
axis	nothing	nothing	all others
outflow			
periodic			
solid			
symmetry			
wall	shear condition	shear condition	all others
pressure far-field	not available	not available	not available
fan			
porous jump			
radiator			
fluid	momentum, mass,	momentum, mass,	porous zone;
	turb. sources;	turb. sources;	porosity;
	momentum, mass,	momentum, mass,	all others
	turb. fixed values;	turb. fixed values;	
	other porous	other porous	
	inputs	inputs	

设置边界条件的步骤：

你需要给每一个边界执行的步骤如下：

1. 在 Boundary Conditions 面板的 Zone 列表中选择边界；
2. 如果必要，在这个边界上为 mixture 设置条件。（见上述有关的需要为 mixture 设置条件的信息）。
   （a） In the Phase drop-down list, select mixture.
   （b） If the current Type for this zone is correct, click Set… to open the corresponding panel(e.g., the Pressure Inlet panel); otherwise, choose the correct zone type in the Type list, confirm the change(when prompted), and the corresponding panel will open automatically.
   （c） In the corresponding panel for the zone type you have selected(e.g., the Pressure Inlet panel, shown in Figure 20.6.13), specify the mixture boundary conditions.

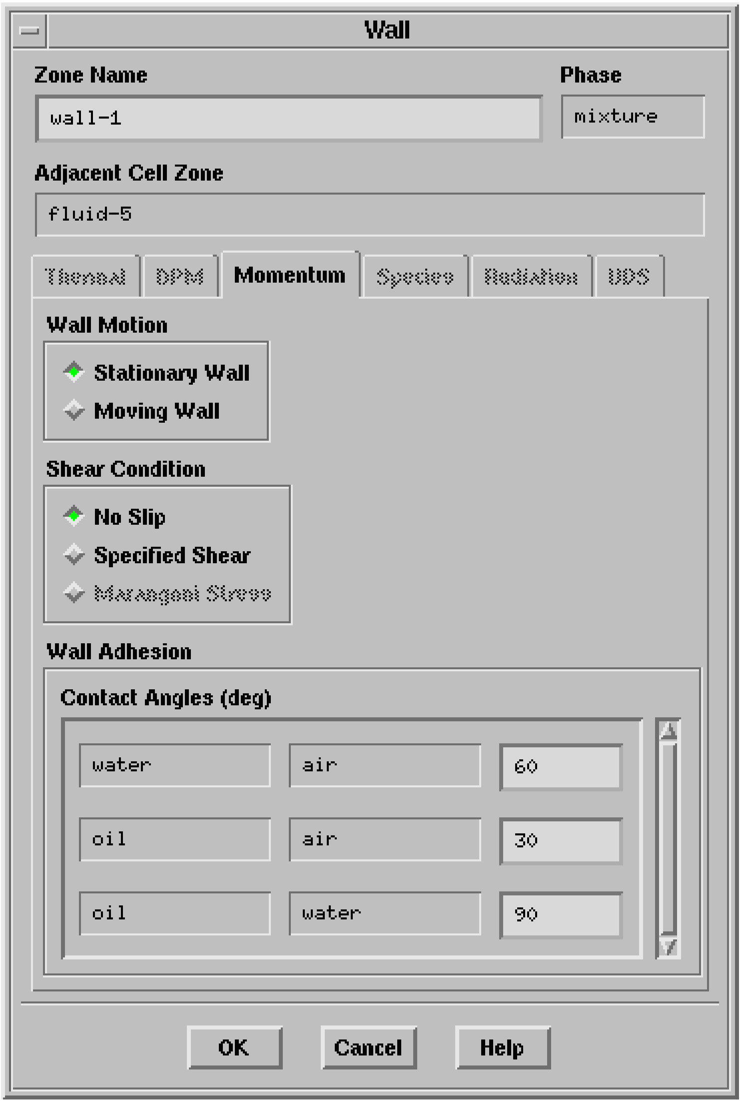
Figure 20.6.13: The **Pressure Inlet** Panel for a Mixture



注： 仅仅那些适用于所有相的条件，如上所述，将出现在这个面板中。

!! 对于 VOF 计算，如果你在 Phase Interaction 面板中选择了 Wall Adhesion,你能在 wall 上指定接触角为每一对相（as shown in Figure 20.6.14）.

Figure 20.6.14: The **Wall** Panel for a Mixture in a VOF Calculation with Wall Adhesion



接触角（θ_w in Figure 20.2.2）就是壁面和接触面切线的夹角，量度了在 Wall 面板的成对的列表中第一相的值。例如，如果你设置 oil 和 air 相的接触角在 Wall 面板中（as shown in Figure 20.6.14），　θ_w 量度在 oil 相内。

对于所有对默认值是 90 度，就是没有壁面支持的影响（也就是，接触面垂直于支持面）。例如，接触角为 45 度，相当于水沿着容器面爬行，通常是水在玻璃上。

（d） Click OK when you are done setting the mixture boundary conditions.

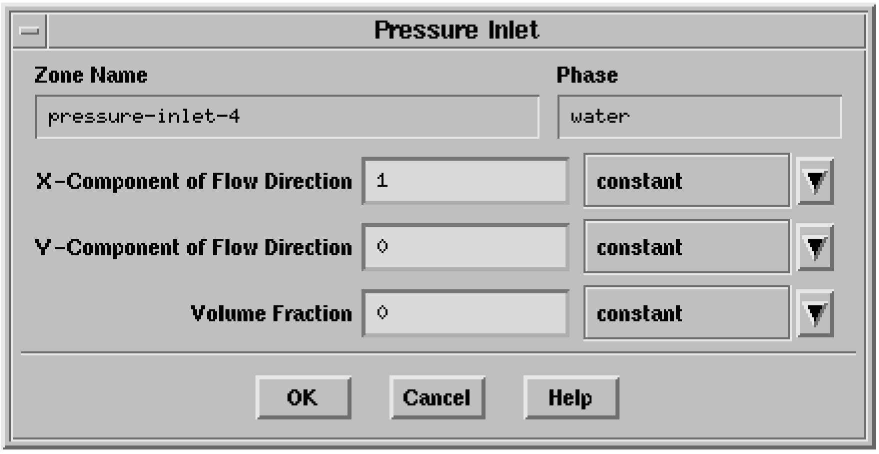
(3)如果必要，在这个边界上为每一相设置条件。（上述有关必要为每一相设置条件的信息）。

（a） In the **Phase** drop-down list, select the phase (e.g., **water**).

!! 注意：当你选择了单相中的一个（而不是 mixture），只有一类区域出现在 Type 列表中。在给定的边界上是不可能指定 phase-specific zone 类的，这种区域类型是为 mixture 指定的，它也适用于所有的单相。

（b）Click **Set...** to open the panel for this phase's conditions (e.g., the **Pressure Inlet** panel, shown in Figure 20.6.15).

Figure 20.6.15: The **Pressure Inlet** Panel for a Phase



(c) Specify the conditions for the phase. Note that only those conditions that apply to the individual phase, as described above, will appear in this panel.

(d) Click **OK** when you are done setting the phase-specific boundary conditions.

复制边界条件的步骤：

为多相流动复制边界条件的步骤与在 section6.1.5 中描述的为单相流动的有些不同。修改的步骤如下：

1. In the Boundary Conditions panel, click the Copy... button. This will open the Copy BCs panel.

2. In the From Zone list, select the zone that has the conditions you want to copy.

3. In the To Zones list, select the zone or zones to which you want to copy the conditions.

4. In the Phase drop-down list, select the phase for which you want to copy the conditions (either **mixture** or one of the individual phases).

!! Note that copying the boundary conditions for one phase does not automatically result in the boundary conditions for the other phases and the mixture being copied as well. You need to copy the conditions for each phase on each boundary of interest.

5. Click Copy. FLUENT will set *all* of the selected phase's (or mixture's) boundary conditions on the zones selected in the To Zones list to be the same as that phase's conditions on the zone selected in the From Zone list. (You cannot copy a subset of the conditions, such as only the thermal conditions.)

见 section 6.1.5 有更多的关于复制边界条件的信息，包括限制。

20.6.15 设置初始容积比率

一旦你初始化了流动（as described in section 22.13）,你就能定义相的初始分布。对于瞬态模拟，这个分布将作为初始条件在 t=0 时刻；对于稳态模拟，设置初始分布在计算的早期阶段能提供更多的稳定性。

你可以使用 Patch 面板为第二相修订（ patch）初始容积比率。

Solve →Initialize →Patch...

如果你想修订容积比率的区域已经作为隔离的单元区被定义，你只能修订那个地方的值。否则，你可以创建一个包括合适单元的“寄存器”并在这个寄存器 中修订值。详细内容见 section 22.13.2.

20.6.16 可压缩 VOF 和 Mixture 模型计算的输入

如果你使用的是 VOF 或 mixture 模型为可压缩流动，注意如下：

- ★ 只有相中的一个是可压缩的（也就是只有一相材料的密度你可以选用理想气体定律）。
- ★ 如果你使用的是 VOF 模型，由于稳定性的原因，如果主相是可压缩的会更好（尽管是不需要的）。
- ★ 如果你在边界上指定总压力（也就是 pressure inlet or intake fan），在那个边界上的具体的温度值对于可压缩相将会使用 total temperature，而对其他相使用 static temperature(它们是不可压缩的)。

详见 section 8.5 有更多关于不可压缩流的更多消息。

20.6.17 凝固/熔解 VOF 计算的输入（Input for Solidification/Melting VOF Calculation）

如果在你的 VOF 计算中包含了熔解和凝固，注意如下：

3. 在单相和多相下模拟熔解和凝固是可能的。
4. 对没有熔解或凝固的相，你必须设置潜热 L（latent heat）,液相温度（$T_{liquidus}$）和固相温度（$T_{solidus}$）为零。

关于熔解和凝固的详细内容详见第 21 章。

20.7 一般多相流问题的求解策略（Solution Strategies for General Multiphase Problems）

VOF 模型、混合模型和欧拉模型的求解策略分别在 Section20.7.1,20.7.2 和 20.7.3 中给出。

20.7.1VOF 模型的求解策略（Solution Strategies for the VOF Model）

为了提高 VOF 模型求解的精度和收敛性，几条建议列举如下：

Setting the Reference Pressure Location

参考压力的位置应该移动到能减少压力计算的位置。默认的情况，参考压力的位置在单元中心或靠近点（0，0，0)。你可以通过指定新的 Reference Pressure Location 在 **Operating Conditions** panel.中移动这个位置。

Define →Operating Conditions...

你选择的位置应当在这样的区域，那里总是包含密度最小的流体（也就是，气相，如果你计算的有一个气相和一个或多个液相)。这是因为当给定相同的速度分布时高密度流体的静压变化大于低密度流体。如果相对压力为零的区域出现在压力变化小的区域，将比压力变化出现在大的非零值的区域带来少的计算量。例如，在包含空气和水的系统，参考压力的位置选在充满空气的区域而不选在充满水的区域是非常重要的。

Pressure Interpolation Scheme

对所有的 VOF 计算，你应当使用 body-force-weighted pressure interpolation scheme or the PRESTO! scheme.

Solve →Controls →Solution...

Discretization Scheme Selection for the Implicit and Euler Explicit Formulations

当 the implicit or Euler explicit scheme 使用时，为了提高相间界面的清晰度（sharpness）你应当采用 second-order or QUICK discretization scheme 为 volume fraction equations。

Solve →Controls →Solution...

Pressure-Velocity Coupling and Under-Relaxation for the Time-Dependent Formulations

设置求解器的另一个变化是在你使用的速度压力耦合方案和欠松弛因子中。通常瞬变流计算建议采用 PISO 方案。使用 PISO 时允许增加所有欠松弛因子的值，而不会减弱解的稳定。通常你能增加所有变量的欠松弛因子到 1 并且能达到预期的稳定和收敛速度(要求每一时间步内用较少的迭代次数)。对于在四边形和三角形网格上的计算，用 PISO 方案时为了提高稳定性建议为压力选欠松弛因子为 0.7-0.8。

Solve →Controls →Solution...

当用 FLUENT 进行任何模拟时，如果欠松弛因子设置为 1 时，解出现不稳定、发散行为，欠松弛因子必须减小。提高稳定性的另一个方法是减小时间步长。

Under-Relaxation for the Steady-State Formulation

如果你使用稳态隐式的 VOF 方案，为了提高稳定性，所有变量的欠松弛因子应设置在 0.2~0.5 之间。

20.7.2 混合模型的求解策略（Solution Strategies for the Mixture Model）

Setting the Under-Relaxation Factor for the Slip Velocity

你应当为滑流速度选用较低的欠松弛因子开始混合模型的计算。建议采用 0.2 或更小。如果解显示出好的收敛行为，你可逐渐增加这个值。

Calculating an Initial Solution

对某些情况（如旋风分离），如果开始计算时不求解体积份额和滑流速度方程，你会更快的获得解。一旦你启动了混合模型，你能暂时是这些方程无效而开始初始计算。

Solve →Controls →Solution...

在 **Solution Controls** panel 下，在 Equations 列表下不选 **Volume Fraction** 和 **Slip Velocity**.这样你开始计算初始流场。一旦收敛的流场获得了，你再打开 **Volume Fraction** 和 **Slip Velocity**

方程，开始混合计算。

20.7.3 欧拉模型的求解策略（Solution Strategies for the Eulerian Model）

Calculating an Initial Solution

为了提高收敛性，在求解完整欧拉多相流模型前你可以先获得初始解。有两种方法你可以用来为欧拉多相流计算获得初始解：

5. 启动和求解问题用混合模型（选或不选滑流速度都可）代替欧拉模型。然后启动欧拉模型，完成设置，采用混合模型的解作为起点继续计算。
6. 通常启动欧拉多相流计算，但是仅计算主相的流动。这样做时，在 **Solution Controls** panel 的 **Equations** 下面不选 **Volume Fraction**. 一旦你为主相获得了初始解，打开 volume fraction 方程继续为各相计算。

!! 注意：没有获得用混合模型或欧拉模型作为欧拉多相流模型的初始解，你不应该使用单相解。这样做，不能提高收敛性，可能会给流动的收敛带来更多的困难。

Temporarily Ignoring Lift and Virtual Mass Forces

如果你计划在稳态欧拉多相流模拟中包含升力和虚拟质量力，你经常减弱问题的稳定性，这有时发生在计算的早期阶段，是由于暂时忽略了升力和虚拟质量力引起的。一旦没有这些力的解开始收敛，你可以打断计算，合适地定义这些力，继续计算。

20.8 一般多相流问题的后处理（Postprocessing General Multiphase Problems）

三种一般的多相流模型中的每一种都提供了一些你能画图和汇报的附加的场函数。你也可以汇报流动比率为三种模型中单个相，为混合模型和欧拉计算中每一相显示速度矢量。

20.8.1 可用的后处理变量（Available Postprocessing Variables）

当你使用其中的一种一般多相流模型模型时，几个附加的场函数对后处理好是有用的，这里列举如下。见第 27 章有场函数和它们定义的完整的列表。第 25 章和第 26 章解释了如何产生图象显示和数据汇报。

VOF 模型

对 VOF 计算你可以产生如下所列项目的图象显示和数据汇报：

- Volume fraction of phase-n (in the Phases... category)
- **Density of phase-n** (in the **Density...** category)
- **Molecular Viscosity of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **Thermal Conductivity of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **Specific Heat of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **Enthalpy of phase-n** (in the **Temperature...** category)
- **Total Enthalpy of phase-n** (in the **Temperature...** category)
- **Total Energy of phase-n** (in the **Temperature...** category)
- **Internal Energy of phase-n** (in the **Temperature...** category)

The non-phase-specific variables that are available (e.g., Molecular Viscosity and Thermal Conductivity) represent mixture quantities. The thermal quantities listed above will be available only for calculations that include the energy equation.

混合模型

对混合模型的计算你可以产生如下所列项目的图象显示和数据汇报：

- Volume fraction of phase-n (in the Phases... category)

- **Density of phase-n** (in the **Density...** category)
- **phase-n Velocity Magnitude** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n Relative Velocity Magnitude** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n X, Y, Z,** etc. **Velocity** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n Relative X, Y, Z,** etc. **Velocity** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n Stream Function** (in the **Velocity...** category)
- **Molecular Viscosity of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **Diameter of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **Thermal Conductivity of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **Specific Heat of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **Enthalpy of phase-n** (in the **Temperature...** category)
- **Total Enthalpy of phase-n** (in the **Temperature...** category)
- **Total Energy of phase-n** (in the **Temperature...** category)
- **Internal Energy of phase-n** (in the **Temperature...** category)

The non-phase-specific variables that are available (e.g., Velocity Magnitude and X Velocity) represent mixture quantities. The thermal quantities listed above will be available only for calculations that include the energy equation.

！！注意，如果你读一个混合模型的数据文件给 FLUENT，在画图和汇报上面所列项目前你必须运行 Solver 进行一次迭代。（当你正用 FLUENT 计算时画图和汇报这些变量，这是不必要的）。

欧拉模型

对欧拉模型的计算你可以产生如下所列项目的图象显示和数据汇报：

- Volume fraction of phase-n (in the Phases... category)
- **Density of phase-n** (in the **Density...** category)
- **phase-n Velocity Magnitude** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n Relative Velocity Magnitude** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n X, Y, Z,** etc. **Velocity** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n Relative X, Y, Z,** etc. **Velocity** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n Stream Function** (in the **Velocity...** category)
- **phase-n Turbulent Viscosity** (in the **Turbulence...** category)
- **phase-n Wall Yplus** (in the **Turbulence...** category)
- **phase-n Turbulent Kinetic Energy** (in the **Turbulence...** category)
- **phase-n Turbulent Dissipation Rate** (in the **Turbulence...** category)
- **phase-n Production of k** (in the **Turbulence...** category)
- **Molecular Viscosity of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **Diameter of phase-n** (in the **Properties...** category)
- **phase-n Wall Shear Stress** (in the **Wall Fluxes...** category)
- **phase-n X, Y, Z Wall Shear Stress** (in the **Wall Fluxes...** category)
- **phase-n Skin Friction Coefficient** (in the **Wall Fluxes...** category)

The availability of the turbulence quantities listed above will depend on which multiphase turbulence model you used in the calculation.

！！注意：如果你读一个 Eulerian 多相数据文件给 FLUENT，在画图和汇报上面所列项目前你必须运行 Solver 进行一次迭代。(当你正用 FLUENT 计算时画图和汇报这些变量，这是不必要的）。

20.8.2 显示单相的速度矢量（Display Velocity Vectors for Individual Phases）

对混合和欧拉计算，使用 **Vector** panel 显示单相的速度矢量是可能的。

Display →Vectors...

为了显示特殊相的速度矢量，在 **Vector Of** 下拉列表中选 **phase-n Velocity**(这里 phase-n 被感兴趣相的名字所代替，例如，**air-bubbles Velocity**)。你也可选 **Relative phase-n Velocity** 来显示相对于移动参考体系的相的速度。为了显示混合相速度 $\vec{v}_m$（仅与混合模型的计算相关），选择 **Velocity**（or **Relative Velocity** for the mixture velocity relative to a moving reference frame.）

20.8.3 报告单相的流量（Report Fluxes for Individual Phase）

当你使用 **Flux Reports** panel 计算通过边界的流量时，你应该指出报告是对混合相的还是对单相的。

Report →Fluxes...

选择 mixture 在 Phase 下拉列表中在面板底部来报告混合相流量，或者选择相的名字来报告所选相的流量。

20.8.4 报告单相在壁面上的力（Reporting Forces on Walls for Individual Phase）

对欧拉计算，当你使用 Force Reports panel 来计算力或壁面边界上的动量时，你应当指定你想要为之计算力的单相。

Report →Forces...

在面板左边的 Phase 下拉列表中选择你所要选的相的名字。

20.8.5 报告单相的流量比率(Reporting Flow Rates for Individual Phase)

你可以使用 report/mass-flow text 命令来获得每一相（或混合相）通过每一流动边界上的质量流量比率。

report →mass-flow

当你指定感兴趣的相（混合相或者单相），FLUENT 将列出每个区域，区域后面跟着是所指定相质量流率所通过的区域。举例如下：

```
/report> mf

(mixture water air)
domain id/name [mixture] air

zone 10 (spiral-press-outlet): -1.2330244
zone 3 (pressure-outlet): -9.7560663
zone 11 (spiral-vel-inlet): 0.6150589
zone 8 (spiral-wall): 0
zone 1 (walls): 0
zone 4 (velocity-inlet): 4.9132133

net mass-flow: -5.4608185
```

使用求解器

本章介绍 FLUENT 求解器的结构以及使用方法。

目录

数值格式概况
离散
分离解
耦合解
求解器的使用概况
离散差分格式的选择
选择压力速度耦合方法
设定松弛因子
改变 Courant 数
Turning On FAS Multigrid
设定解的限制
解的初始化
计算
监视解的收敛性
计算期间命令的执行
收敛性与稳定性

数值格式概况

FLUENT 提供两种数值求解方法：分离解法("FLUENT/UNS")和耦合解法("RAMPANT")。

Fluent 的两种解法都可以解守恒型积分方程，其中包括动量、能量、质量以及其他标量如湍流和化学组分的守恒。在两种情况下都应用了控制体技术，它包括：

使用计算网格对流体区域进行划分

对控制方程在控制区域内进行积分以建立代数方程，这些代数方程中包括各种相关的离散变量如：速度、压力、温度以及其他的守恒标量

离散方程的线化以及获取线性方程结果以更新相关变量的值

两种数值方法采用相似的离散过程——有限体积，但线化的方法以及离散方程的解法是不同的。首先我们在离散解法与耦合解法中讨论一般的解法，然后讨论一下线性显式与隐式中的线化方法

分离解方法

分离求解器原来是 FLUENT 4 和 FLUENT/UNS 所用的算法。使用该方法，控制方程是分离解出的（即：一个一个的解）。因为控制方程是非线性的（还是耦合的），所以在得到收敛解之前，必须进行迭代。下面是对每步迭代的介绍：

1. 在当前解的基础上，更新流体属性（如果计算刚刚开始，流体的属性用初始解来更新）

2. 为了更新流场，u，v 和 w 的动量方程用当前压力和表面质量流量按顺序解出。
3. 因为第一步得到的速度可能在局部不满足连续性方程，所以从连续性方程和线化动量方程推导出压力校正的泊松方程。然后解出压力校正方程获取压力和速度场以及表面质量流量的必要校正从而满足连续性方程。
4. 在适当的地方，用前面更新的其它变量的数值解出湍流、能量、组分与及辐射等标量。
5. 当包含相间耦合时，可以用离散相轨迹计算来更新连续相的源项。
6. 检查设定的方程的收敛性。

直到满足收敛判据才会结束上述步骤。

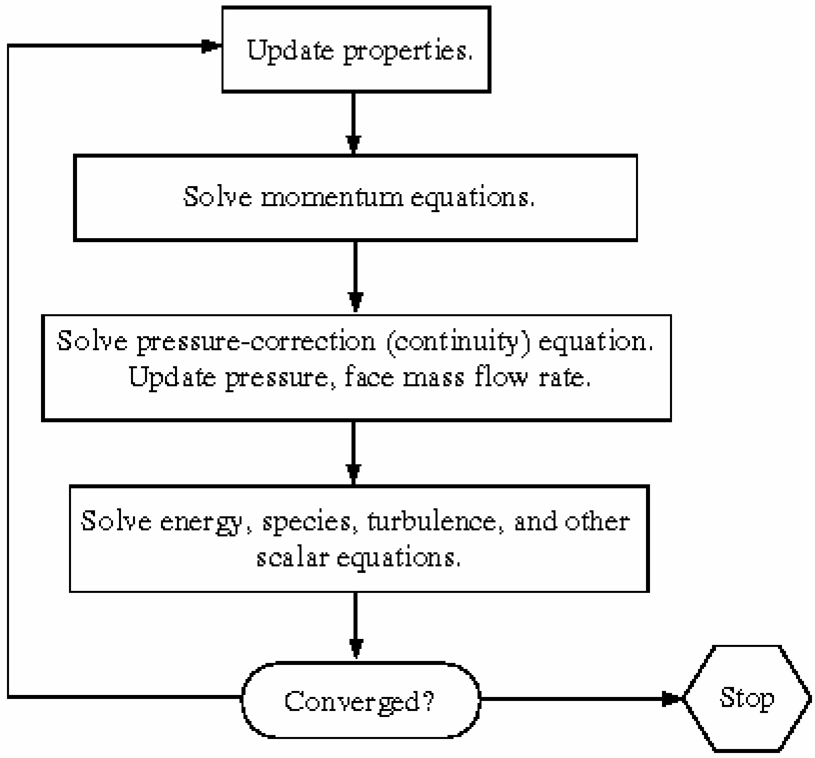


Figure 1: 分离求解器方法概述

耦合解方法

耦合求解器原来用于 RAMPANT。该方法同时解连续性、动量、能量以及组分输运的控制方程（即：耦合在一起）。然后分离解方法中的分离求解器程序解附加的标量控制方程（即：和耦合方程是分离的）。因为控制方程式非线性的和耦合的，所以在获取收敛解之前需要进行适当的解循环的迭代。组成每一步迭代的步骤见上图，现概括如下：

1. 在当前解的基础上更新流体属性（如果刚刚开始计算则用初始解来更新）。
2. 同时解连续性、动量、能量和组分输运方程。
3. 在适当的地方，用前面更新的其它变量的数值解出如湍流和及辐射等标量。
4. 当包含相间耦合时，可以用离散相轨迹计算来更新连续相的源项。
5. 检查设定的方程的收敛性。

直到满足收敛判据才会结束上述步骤。

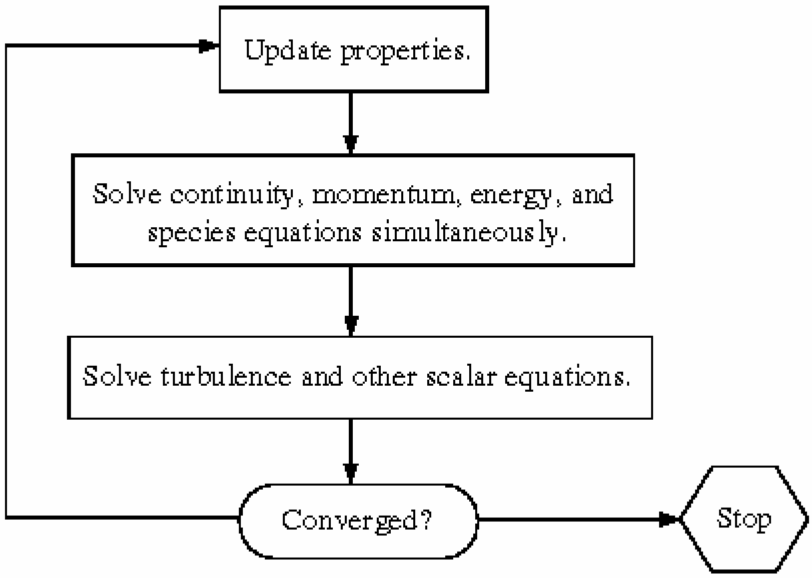


Figure 1: 耦合解方法概述

线化：隐式和显式的比较

在分离和耦合解方法中，离散，非线性控制方程被线化为每一个计算单元中相关变量的方程组。然后用线化方程组的解来更新流场。

控制方程的线化形式可能包括关于相关变量的隐式或显式形式。隐式和显式的意义如下：

- 隐式：对于给定变量，单元内的未知值用邻近单元的已知和未知值计算得出。因此，每一个未知值会在不止一个方程中出现，这些方程必须同时解来给出未知量。
- 显示：对于给定变量，每一个单元内的未知量用只包含已知量的关系式计算得到。因此未知量只在一个方程中出现，而且每一个单元内的未知量的方程只需解一次就可以给出未知量的值。

在分离求解器中，每一个离散控制方程都是该方程的相关变量的隐式线化。从而区域内每一个单元只有一个方程，这些方程组成一个方程组。因为每一个单元只有一个方程，所以常常会被称为标量系统方程。点隐式（高斯-塞德尔）线化方程求解器和代数多重网格方法(AMG)一起被用于解单元内相关变量的标量系统方程。例如，x 向动量方程被线化得到速度 u 未知的方程系统。方程系统的共时解（用标量 AMG 求解器）更新了 u 方向上的速度场。

总而言之，分离解方法同时考虑所有单元来解出单个变量的场（如：p）。然后再同时考虑所有单元来解出下一个变量的场，直至全部解出。分离求解器没有什么明确的选项。

在耦合解方法中你可以选择控制方程的隐式或者显式线化形式。这一选项只用于耦合控制方程组。与耦合方程组分开解的附加标量，如湍流、辐射等，的控制方程是采用和分离解方法中介绍的相同程序来线化和解出的。不管你选择的是显式还是隐式格式，解的过程都要遵循上图中的耦合解方法。

如果你选择耦合求解器的隐式选项，耦合控制方程组的每一个方程都是关于方程组中所有相关变量的隐式线化。这样我们便得到了区域内每一个单元的具有 N 个方程的线化方程系统,其中 N 是方程组中耦合方程的数量。因为每一个单元中有 N 个方程，所以这通常被称为方程的块系统。因为每个单元有 N 个方程，所以它通常被称为方程的块系统。点隐式（块结构高斯-塞德尔）线化方程求解器和代数多重网格方法 (AMG)一起被用于解单元内 N 个

相关变量的块系统方程。例如，连续性方程和 x，y，z 方向动量方程以及能量方程的耦合会产生一个方程系统，在这个方程系统中，p，u，v，w 和 T 都是未知的。用块 AMG 求解器同时解这些方程就会马上更新压力、三个坐标轴方向上的速度以及温度场。

总而言之，耦合隐式求解器同时在所有单元内解出所有变量（p, u, v, w, T）。

如果你选择耦合求解器的显式选项，耦合的一组控制方程都用显式的方式线化。和隐式选项一样，通过这种方法也会得到区域内每一个单元的具有 N 个方程的方程系统。同样地，方程系统中的所有相关变量都同时更新。然而，方程系统中都是未知的因变量。例如，x 向动量方程写成的形式是为了保证更新后的 x 速度为流场变量已知值的函数。正因为如此，我们不需要线化方程求解器。取而代之的是，解的更新是使用多步（Runge-Kutta）求解器来完成的。在这里你可以选择全近似存储（FAS）多重网格格式来加速多步求解器。FAS 多重网格的耦合显示求解器原来是用于 RAMPANT 中的。

总而言之，耦合显式方法同时解一个单元内的所有变量（p，u，v，w，T）。

注意 FAS 多重网格是显式求解器方法的一个可选部分，而 AMG 方法是分离和耦合隐式方法需要的部分。

离散

FLUENT 使用基于控制体的方法将控制方程转换为可以用数值方法解出的代数方程。该方法，在每一个控制体内积分控制方程，从而产生基于控制体的每一个变量都守恒的离散方程。

考虑标量 ϕ 输运的定常状态守恒方程可以很容易的说明控制方程的离散。下面就是写成对于控制体积 V 的积分形式的方程：

$$\oint \rho\phi v \cdot dA = \oint \Gamma_\phi \nabla\phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV$$

其中

r = 密度

v = 速度矢量(= u ,i(hat) + v ,j(hat) in 2D)

A = 曲面面积矢量

G_f = f 的扩散系数

?f = f 的梯度 (= (秄/?x) ,i(hat) + (秄/?y) ,j(hat) in 2D)

S_f = 每一单位体积 f 的源项

上面的方程被应用于区域内每一个控制体积或者单元。下面图中的二维三角单元就是控制体积的一个例子。在给定单元内离散上面的方程有：

$$\sum_f^{N_{faces}} v_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla\phi)_n A_f + S_\phi V$$

where

N_faces = 封闭单元的面的个数

f_f = 通过表面 f 的对流量

v_f = 通过表面的质量流量

A_f = 表面 ϕ 的面积，|A| (= | A_x i(hat) + A_y j(hat) | in 2D)

(?f)_n = magnitude of ?f normal to face f

V = 单元体积

由 FLUENT 所解的方程和上面所给出的一般形式相同，而且很容易扩展到多维情况和友人以多边形、多面体组成的非结构网格。

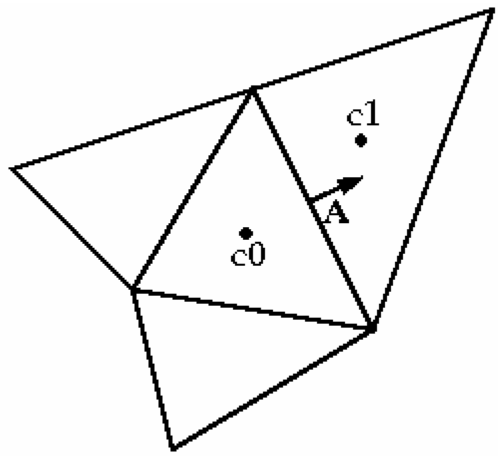


Figure 1: 用于显示标量输运方程离散的控制体积

FLUENT 在单元的中心（上图的 c0 和 c1）存贮标量 f 的离散值。然而，方程 3 的对流项中需要表面值 f_f，因此必须从单元中心插值。这个任务由迎风格式完成。

迎风的意思就是，表面值 f_f 是从单元上游或者说迎风处的量推导出来的，这个上游是指相对于方程 3 法向速度 v_n 的方向而言的，FLUENT 允许你选择几种迎风格式：一阶迎风，二阶迎风，幂率和 QUICK 格式。这些格式在一阶迎风格式一节中介绍[95]。

方程 3 中的扩散项是中心差分而且一般具有二阶精度。

一阶迎风格式

当需要一阶精度时，我们假定描述单元内变量平均值的单元中心变量就是整个单元内各个变量的值，而且单元表面的量等于单元内的量。因此，当选择一阶迎风格式时，表面值 f_f 被设定等于迎风单元的单元中心值。

幂率格式

幂率离散格式使用一维对流扩散方程的精确解来插值变量 f 在表面处的值。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x}\Gamma\frac{\partial \phi}{\partial x}$$

其中 G 和 r u 是通过间隔?x 的常值。积分方程 1 可得如下 f 随 x 的变化关系：

$$\frac{\phi(x) - \phi\ 0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp\left(P\varepsilon\frac{x}{L}\right) - 1}{\exp(P\varepsilon) - 1}$$

其中：

f_0 = f|_x=0

f_L = f|_x=L

Pe 是 Peclet 数。

$$P\varepsilon = \frac{\rho u L}{\Gamma}$$

下图所示为不同 Pelect 数下 f(x)在 x=0 和 x=L 之间的变化关系。该图表明对于较大的 Pe，f 在 x=L/2 处的值近似等于迎风值。这就意味着当流动由对流项主导时，只需要让变量表面处的值等于迎风或者上游值就可以完成插值。这是 FLUENT 的标准一阶格式。

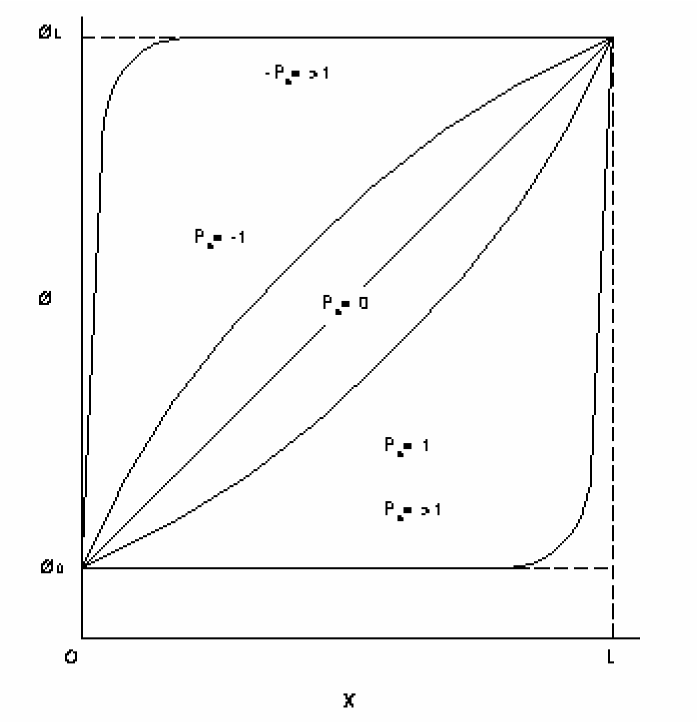


Figure 1: 变量 f 在 x=0 和 x=L 之间的变化（方程 1）

如果选择幂率格式，FLUENT 用方程 3 等价的幂率格式[118]作为插值格式。

如一阶迎风格式所述，上图表明，对于较大的 Pe，f 在 x=L/2 处的值近似等于迎风值。当 Pe=0（无流动或者纯扩散）图 1 表明 f 可以用 x=0 到 x=1 之间简单的线性平均来实现插值。当 Peclet 数的值适中时，f 在 x=L/2 处的插值必须使用方程 3 等价的幂率插值格式来得到。

二阶迎风格式

当需要二阶精度时，使用多维线性重建方法[5]来计算单元表面处的值。在这种方法中，通过单元中心解在单元中心处的泰勒展开来实现单元表面的二阶精度值。因此，当使用二阶迎风格式时，用下面的方程来计算表面值 f_f：

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \Delta S$$

其中 f 和?f 分别是单元中心值和迎风单元的梯度值，Ds 是从迎风单元中心到表面中心的位移矢量。在这种情况下需要确定每个单元内的梯度?f。我们使用散度定理来计算这个梯度，其离散格式如下：

$$\nabla\phi = \frac{1}{V}\sum_{f}^{N_{faces}} \bar{\phi}_f A$$

在这里，表面处的值 f _f 由邻近表面的两个单元的 f 的平均值来计算。最后，限制梯度?f 以保证不会引进新的最大值和最小值。

QUICK 格式

对于四边形和六面体网格，我们可以确定它们唯一的上游和下游表面以及单元。

FLUENT 还提供了计算对流变量ϕ在表面处高阶值的 QUICK 格式。QUICK 类型的格式[95]是通过变量的二阶迎风与中心插值加上适当的权因子得到的，具体可以写成：

$$\phi_e = \theta\left[\frac{S_d}{S_c+S_d}\phi_P + \frac{S_d}{S_c+S_d}\phi_E\right] + (1-\theta)\left[\frac{2S_u+S_c}{S_u+S_c}\phi_P - \frac{S_c}{S_u+S_c}\phi_W\right]$$

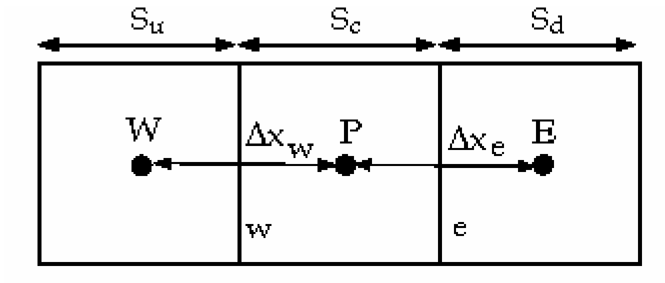


Figure 1: 一维控制体

在上式中ϕq=1 就是中心二阶插值，ϕq=0 就是二阶迎风值。传统的 QUICK 格式对应的ϕq= 1/8。FLUENT 中使用一个变量，解相关的 q 值，以避免引进新的解的极值。

当结构网格和流动方向一致时，QUICK 格式明显具有较高精度。需要注意的是 FLUENT 也允许对非结构网格或者混合网格使用 QUICK 格式，在这种情况下，常用的二阶迎风离散格式将被用于非六面体单元表面或者非四边形单元表面。当使用并行求解器时，二阶迎风格式还被用于划分的边界处。

离散方程的线化形式

离散标量输运方程（离散一节中的方程 3）包括了单元中心的标量 f 的未知值，还包括周围相邻单元出的未知值。一般说来这些方程关于这些变量是非线性的。离散一节中方程 3 的线化形式为：

$$a_P\phi = \sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + b$$

其中下标 nb 是指相邻单元，a_p 和 a_nb 分别是 f 和 f_nb.的线化系数。

每一个单元的邻近单元的数量取决于网格的拓扑结构，但是一般说来都等于围成该单元的表面的数量（边界单元除外）。

在网格中每一个单元都可以写出相似的方程。这样就产生了具有稀疏系数矩阵的代数方程。对于标量方程，FLUENT 是用点隐式（Gauss-Seidel）线化方程求解器与代数多重网格方法（AMG）连接起来从而解出这个线性系统。

亚松驰

由于 FLUENT 所解方程组的非线性，我们有必要控制ϕ的变化。一般用亚松驰方法来实现控制，该方法在每一部迭代中减少了 f 的变化量。亚松驰最简单的形式为：单元内变量 f 等于原来的值 f_old 加上亚松驰因子 a 与 f 变化的积：

$$\phi = \phi_{old} + \alpha\Delta\phi$$

分离求解器

在本节中，我们主要介绍了几个练习，这几个练习和动量方程和连续性方程的离散以及通过分离求解器计算出相应的解有关。通过考虑定常状态的连续性和动量方程一般形式可以和容易介绍这几个练习：

$$\oint \rho v \cdot dA = 0$$

$$\oint \rho v v \cdot dA = \oint pI \cdot dA + \oint \tau \cdot dA + \int_V F dV$$

其中 I 是单位矩阵，t 是应力张量，F 是力矢。

动量方程的离散

标量输运方程的离散中所讨论的离散格式也用于离散动量方程。例如，设定 f=u 可以很容易得到 x 向动量方程：

$$a_P u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f \cdot \hat{i} A + S$$

如果已知压力场和表面质量通量，我们就可以用离散一节所介绍的方法来解方程 1 并获取一个速度场。但是，压力场和表面质量流率预先是未知的，因此必须作为解的一部分。关于压力的存储和压力梯度项的离散有重要的问题需要讨论，下一步我们就会讨论这些问题。

FLUENT 使用共同定位格式，在这种情况下，压力和速度共同存储在单元中心。然而，如离散一节的图 1 所示，方程 1 需要单元 c0 和 c1 之间的表面处的压力值。因此，我们需要使用插值格式来从单元处压力值计算表面压力值。

压力插值格式

在默认的情况下，FLUENT 使用动量方程系数[132]来处理表面处的压力插值。只要单元中心的压力变化比较光滑，这个程序都可以算得很好。当控制体之间的动量源项有跳跃或者较大的梯度时，在单元表面处的压力轮廓会有较大的梯度，此时不可以用这种格式来插值。如果还是用这种格式，就会出现单元速度过大和过小的矛盾。

标准压力插值格式有问题的流动包括：具有大体积力的流动，如强烈的漩流、高 Rayleigh 数自然对流等。在这种情况下，有必要在大梯度区域处理网格从而能够较好的分辨压力的变化。

FLUENT 的另一个误差源就是假定壁面法向压力梯度为零。这种假定对于边界层是有

效的，但是对于出现体积力或者曲率的情况就不合适了。此外，压力梯度计算最明显的错误就是速度矢量指向或者指出壁面。

当标准压力插值格式不可用时，FLUENT 提供了几种可选的方法：

- 线性格式用相邻单元压力的平均值来计算表面压力。
- 二阶格式用二阶精度对流项（见二阶迎风格式一节）中使用的方法来重建表面压力。这一格式可能会比标准和线性格式有所改善，但是如果将其用于初始计算和/或较差网格计算就可能会出现一些麻烦。
- 体积力加权格式假定压力和体积力之间差值梯度为常数来计算表面压力。如果动量方程中的体积力预先知道（如：浮力和轴对称涡流的计算），那么这一格式会处理得很好。
- PRESTO! (PREssure STaggering Option)格式使用离散连续性平衡来计算交错压力的表面处的交错体积。这一程序和非结构网格中[118]使用的交错网格格式的思想相似。

注意：PRESTO!格式只用于四边形或者六面体网格。

当使用这些可选格式时，推荐大家参阅一下选择压力插值格式一节。

连续性方程的离散

分离求解器中的方程 1 可以在离散一节中的图 1 所示的控制体上积分，从而得到如下离散方程：

$$\sum_{f}^{N_{faces}} J_f = 0$$

其中 J_f 是通过表面 f, r v_n A_f 的质量流速。因此：

$$\sum_{f}^{N_{faces}} \rho v_n A_f = 0$$

如数值格式概述一节所述，动量方程和连续性方程式按顺序解出的。在这个顺序格式中，连续性方程是作为压力的方程使用的。但是对于不可压流动，压力并没有明确出现在方程 3 中，这是因为密度并不是直接和压力相关。SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)的一组算法[118]将压力引进连续性方程。具体可以参阅 SIMPLE 一节。

为了将来能够继续下去，有必要将速度的表面值 v_n 和速度在单元的中心的存储值关联起来。单元中心速度到表面的线性插值会导致压力的非物理校验板（checker-boarding）。FLUENT 用 Rhie 和 Chow[132]概述的相似程序来避免校验板。速度 v_n 的表面值不是线性平均而是动量权重平均，这个权重因子是基于动量方程离散一节中的方程 1 的 a_P 系数的。采用这种程序，表面流动速度 J_f 可以写成：

$$J_f = \hat{J}_f + d_f\left(p_{c0} - p_{c1}\right)$$

其中，p_c0 和 p_c1 是表面两边单元的压力，J(hat)_f 包含了这些单元中速度的影响（见离散一节中的图 1）。d_f 向可以写成：

$$d_f = \frac{\rho A_f^2}{\bar{a}P}$$

a(bar)_P 项是表面两边单元中动量方程 a_P 系数的平均。

压力-速度耦合

使用连续性方程的离散一节中的方程 5 来实现压力速度耦合，从而从离散连续性方程（连续性方程离散一节中的方程 3）推导出一个压力方程。FLUENT 提供了三种可选的压力速度耦合算法：SIMPLE，SIMPLEC 和 PISO。关于这些算法的选择请参阅选择压力速度耦合方法一节。

SIMPLE

SIMPLE 算法使用压力和速度之间的相互校正关系来强制质量守恒并获取压力场。

如果用猜测压力场 p^*来解动量方程，从连续性方程离散一节中的方程 5 所得到的表面流量 J^*_f 为：

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f\left(p_{c0}^* - p_{c1}^*\right)$$

它并不满足连续性方程。因此将校正项 J^'_f 加入到表面流速 J^*_f 中来校正质量流速 J_f：

$$J_f = J_f^* + J_f'$$

此时满足了连续性方程。SIMPLE 假定 J^'_f 写成如下形式：

$$J_f' = d_f\left(p_{c0}' - p_{c1}'\right)$$

其中 p^'是单元压力校正。

SIMPLE 算法将流量校正方程（方程 3 和 5）代入到离散连续性方程（连续性方程的离散一节中的方程 3）从而得到单元内压力校正 p^'的离散方程。

$$a_P p' = \sum_{nb} a_{nb} p_{nb}' + b$$

其中，源项 b 是流入单元的净流速。

$$b = \sum_{f}^{N_{faces}} J_f^*$$

压力校正方程（方程 7）可以用代数多重网格一节中所介绍的代数多重网格方法来解。一旦得到解，使用下面的方程校正单元压力和表面流动速度：

$$p = p^* + \alpha_p p'$$

$$J_f = J_f^* + d_f\left(p_{c0}' - p_{c1}'\right)$$

在这里，a_p 是压力亚松驰因子（请参阅亚松驰方面的介绍）。校正后的表面流速 J_f 在每一部迭代中同一地满足离散连续性方程。

SIMPLEC

基本 SIMPLE 算法的很多变量都可以在相关文献资料中查到。除了 SIMPLE 算法之外，FLUENT 还提供了 SIMPLEC (SIMPLE-Consistent)算法[164]。SIMPLE 算法是默认的，但是对于很多问题如果使用 SIMPLEC 可能会更好一些，具体可以参阅 SIMPLE 与 SIMPLEC 的比较一节。

SIMPLEC 程序和 SIMPLE 程序相似。两种算法所使用的表达式唯一的区别就是表面流动速度校正项。和 SIMPLE 中一样，校正方程可写为：

$$J_f = J_f^* + d_f\left(p'_{c0} - p'_{c1}\right)$$

但是系数 d_f 重新定义为：

$$d_f = \rho A_f^2 \Big/ \left(ap - \sum_{nb} a_{nb}\right)$$

可以看出，在压力速度耦合是得到解的主要因素时，使用修改后的校正方程可以加速收敛。

PISO

压力隐式分裂算子(PISO)的压力速度耦合格式是 SIMPLE 算法族的一部分，它是基于压力速度校正之间的高度近似关系的一种算法。SIMPLE 和 SIMPLEC 算法的一个限制就是在压力校正方程解出之后新的速度值和相应的流量不满足动量平衡。因此必须重复计算直至平衡得到满足。为了提高该计算的效率，PISO 算法执行了两个附加的校正：相邻校正和偏斜校正。

PISO 算法的主要思想就是将压力校正方程[69]中解的阶段中的 SIMPLE 和 SIMPLEC 算法所需的重复计算移除。经过一个或更多的附加 PISO 循环，校正的速度会更接近满足连续性和动量方程。这一迭代过程被称为动量校正或者邻近校正。PISO 算法在每个迭代中要花费稍多的 CPU 时间但是极大的减少了达到收敛所需要的迭代次数，尤其是对于过渡问题，这一优点更为明显。

对于具有一些倾斜度的网格，单元表面质量流量校正和邻近单元压力校正差值之间的关系是相当简略的。因为沿着单元表面的压力校正梯度的分量开始是未知的，所以需要进行一个和上面所述的 PISO 邻近校正中相似的迭代步骤[51]。初始化压力校正方程的解之后，重新计算压力校正梯度然后用重新计算出来的值更新质量流量校正。这个被称为偏斜矫正的过程极大的减少了计算高度扭曲网格所遇到的收敛性困难。PISO 偏斜校正可以使我们在基本相同的迭代步中，从高度偏斜的网格上得到和更为正交的网格上不相上下的解。

多相流中强体积力的特定处理

当多项流中存在较大的体积力（如：重力或者表面张力），动量方程中的体积力项和压力梯度项几乎是平衡的，相比较来说，对流项和粘性项的贡献就较小了。除非考虑压力梯度和体积力的局部平衡，否则分离算法的收敛性会很差。FLUENT 提供了一种可选的隐式体积力处理，这种处理考虑了上面所说的影响从而使得解更具有鲁棒性。

基本的程序是将包含体积力的校正项增加到表面流动校正方程中（SIMPLE 中的方程 13）。这样，SIMPLE 中的方程 9 就多了一个额外的体积力校正项，从而使得流动在迭代过程中提早得到真实的压力场。

这一选项只在多项流计算中使用，但是在默认情况下是关闭的。设定多相流计算的说明中包括了打开隐式体积力处理的说明，具体可以在以下几节中找到相关说明：在 VOF 计算中包括体积力，在气穴计算中包括体积力，在代数滑移混合计算中包括体积力。

除此之外，通过使用体积力的亚松驰因子，FLUENT 允许你控制体积力中的变化。

耦合求解器

FLUENT 中的耦合求解器同时解连续性、动量、(合适的话)能量和组分输运，并将它们作为一组控制方程或者方程的矢量来处理。随后会按顺序解附加标量的控制方程(也就是说这些附加标量方程相互之间是分离的而且和耦合方程组之间是分离的)。

矢量形式的控制方程

将曲面面积微分 dA 作为控制体积，积分描述平均流动属性的单组分流体的控制方程系统，相应的笛卡尔坐标形式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V W dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V H dV$$

其中，矢量 W，F 和 G 分别定义为：

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p\hat{i} \\ \rho v v + p\hat{j} \\ \rho v w + p\overleftarrow{k} \\ \rho v E + p v \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}$$

矢量 H 包含了诸如体积力、能量等源项。

在这里，r、v、E 和 p 分别是流体的密度、速度、单位质量的总能量以及压力。T 是粘性应力张量，q 是热流量。

总能量 E 和总焓 H 的关系为：

$$E = H - p/\rho$$

其中：

$$H = h + |v|^2/2$$

在方程 1 中所表示的 Navier-Stokes 方程在低马赫数下会非常具有刚性，这主要是因为流体速度 v 和声速 c 相差太大。对于不可压流来说这种情况尤其真实，不管流动速度有多大，不可压流体中的声速都是无穷大。在这些情况下，方程的数值刚性会导致较差的收敛速度。在 FLUENT 中，我们采用耦合求解器中的一种被称为(时间导数)预处理[175]的方法克服了这种困难。

预处理

时间导数预处理方法，是用预处理矩阵先乘以矢量形式控制方程中方程 1 的时间导数项。这一步就重新标度了所解方程系统的声速(特征值)，从而减轻了低马赫数和不可压流动中会遇到的数值刚性的影响。

推导预处理矩阵，首先是用微分学中的一个法则(具体看方程就知道了)将守恒量 W 在控制方程的方程 1 的因变量形式变形为原始变量 Q 的形式，结果如下：

$$\frac{\partial W}{\partial Q}\frac{\partial}{\partial t}\int_V QdV + \oint[F-G]\cdot dA = \int_V HdV$$

其中，Q 是矢量{p, u, v, w, T }^T，雅克比（Jacobian）矩阵?W/?Q 为：

$$\frac{\partial W}{\partial Q} = \begin{Bmatrix} \rho_p & 0 & 0 & 0 & \rho T \\ \rho_p u & \rho & 0 & 0 & \rho Tu \\ \rho_p v & 0 & \rho & 0 & \rho Tv \\ \rho_p w & 0 & 0 & \rho & \rho Tw \\ \rho_p H & \rho u & \rho v & \rho w & \rho TH + \rho C_p \end{Bmatrix}$$

其中：

$$\rho_p = \left.\frac{\partial \rho}{\partial p}\right|_T，\ \rho_T = \left.\frac{\partial \rho}{\partial T}\right|_p$$

对于理想气体 d = 1，对于不可压流体 d = 0。

选择原始变量 Q 作为因变量有几个原因。首先，解不可压流动时它是自然的选择。其次，当我们使用二阶精度时，为了得到粘性流动中更高精度的速度和温度梯度以及无粘流动的压力梯度，我们需要重建 Q 而不是 W。最后，选择压力作为因变量允许系统中的声波的传播被挑选出来[165]。

我们用预处理矩阵 G 来替换雅克比矩阵?W/?Q（方程 3）来实现方程的预处理，这样，预处理系统的守恒形式为：

$$\Gamma\frac{\partial}{\partial t}\int_V QdV + \oint[F-G]\cdot dA = \int_V HdV$$

其中：

$$\Gamma = \begin{Bmatrix} \Theta & 0 & 0 & 0 & \rho T \\ \Theta u & \rho & 0 & 0 & \rho Tu \\ \Theta v & 0 & \rho & 0 & \rho Tv \\ \Theta w & 0 & 0 & \rho & \rho Tw \\ \Theta H & \rho u & \rho v & \rho w & \rho TH + \rho C_p \end{Bmatrix}$$

参数 Θ 为：

$$\Theta = \left(\frac{1}{U_r^2} - \frac{\rho T}{\rho C_p}\right)$$

方程 9 中的参考速度 U_r 在当地选取，从而保证系统的特征值关于对流和耗散时间尺度能够调节的很好[175]。

预处理之后的方程系统（方程 5）的特征值为：

$$u, u, u, u' + c', u' - c'$$

其中：

$$F = \frac{1}{2}(F_R + F_L) - \frac{1}{2}\Gamma\left|\hat{A}\right|\sigma Q$$

在这里，d Q 是空间差分 Q_R - Q_L。流量 F_R = F(Q_R)和 F_L = F(Q_L)是用表面“右边”

和“左边”的（重建解）矢量 Q_R 和 Q_L 计算出来的。矩阵|A(hat)|定义为：

$$\left|\hat{A}\right| = M\left|\Lambda\right|M^{-1}$$

其中 L 是特征值的对角阵，M 是 G^-1A 对角化的模式矩阵，其中 A 是无粘流量 Jacobian 矩阵?F/?Q。

对于非预处理系统（和理想气体），方程 13 化简为在 Roe 平均用于估计 G,|A(hat)|时的 Roe 流量差分分裂[133]。目前所使用的是 Q_R 和 Q_L 的平均。

在当前形式中，方程 13 可以看成二阶中心差分加上附加的矩阵耗散。附加的矩阵耗散项不仅对对流变量迎风的产生和超音速流动的压力和流量速度有作用，而且还提供了定常状态的压力速度耦合，并对低速和不可压流的稳定性和高效收敛有作用。

定常流的时间步进法

FLUENT 中耦合控制方程组（预处理中的方程 5）在时间上的离散既可以用于定常计算也可以用于非定常计算。在定常情况下，进行时间步进计算直至达到定常解。耦合方程可以用隐式也可以用显式时间步进来进行时间离散。这两种算法在下面的显式和隐式格式两节中介绍。

显式格式

在显式格式中，预处理的方程 5 是用多步，时间步进算法[73]来离散时间导数的。从第 n 步迭代到第 n+1 步迭代是用 m 步 Runge-Kutta 格式来提高解的，m 步 Runge-Kutta 格式为：

$$R^i = \sum^{N_{faces}}\left(F\left(Q^i\right) - G\left(Q^i\right)\right)\cdot A - VH$$

时间步 D t 是从 CFL（Courant-Friedrichs-Lewy）条件计算得到的

$$\Delta t = \frac{CFL\Delta x}{\lambda_{\max}}$$

其中 l_max 是预处理一节中方程 11 定义的局部特征值的最大值。

使用全近似多重网格方法（FAS）可以加快显示格式的收敛速度，关于 FAS 请参阅后面将要介绍的内容。

通过与相邻残差的隐式平均增加格式的支持可以在后面的计算中增加最大时间步长。残差通过 Laplacian 光滑算子进行过滤，其中 Laplacian 光滑算子为：

$$\overline{R}_i = R_i + \varepsilon\sum\left(\overline{R}_j - \overline{R}_i\right)$$

该方程可以用下面的 Jacobi 迭代解出：

$$\overline{R}_{i_i}^m = \frac{R_i + \varepsilon\sum\overline{R}_j^{m-1}}{1+\varepsilon\sum 1}$$（译者注：分母为什么这样写？）

对于 e=0.5，两次 Jacobi 迭代就足可以允许时间步增加一倍。

隐式格式

在显式格式中，控制方程（预处理一节中的方程 5）的时间 Euler 隐式离散和流量的牛顿类型线化界和得到下面 delta 形式的线化系统[174]：

$$\left[D + \sum_{j}^{N_{faces}} S_{j,k}\right]\Delta Q^{n+1} = -R^{n}$$

中心 D 和对角线下面的系数矩阵 S_j,k 分别为：

$$D = \frac{V}{\Delta t}\Gamma + \sum_{j}^{N_{faces}} S_{j,i}$$

$$S_{j,k} = \left(\frac{\partial F_j}{\partial Q_k} - \frac{\partial G_j}{\partial Q_k}\right)$$

残差矢量 R^n 和时间步 D 分别在显式格式中的方程 1 和方程 3 中定义。

方程 1 是用点 Gauss-Seidel 格式和适应耦合的一组方程的代数多重网格方法解出的。

非定常流的时间离散

对于时间精度计算，可以使用显式和隐式时间步进格式。（隐式方法也被称为双重时间步进法）

显式时间步进

在显式时间步进方法中，使用显式格式一节所介绍的方法，在区域的每一个单元内使用相同的时间步，取消预处理选项。

双重时间步进

为了得到预处理方程的高效的，时间精度解，我们采用双重时间步进法和多步格式。在这里我们在矢量形式的控制方程的方程 1 中引入伪时间导数：

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V W dV + \Gamma\frac{\partial}{\partial \tau}\int_V Q dV + \oint[F - G]\cdot dA = \int_V H dV$$

其中 t 是物理时间，t 是时间步进程序中的伪时间。注意：方程 1 左手边的第二项 t??消失了，而重新获得了矢量形式控制方程中的方程 1。

方程 1 中的时间相关项是用一阶或者二阶精度后向时间差分进行隐式离散的。写成半隐式形式如下：

$$A\phi_e + b = 0$$

其中 f_e 是精确解。在解收敛之前可能会有一个和近似解 f 有关的误差 d：

$$A\phi + b = d$$

我们寻找一个校正 f 的 y，这样，精确解由下式给出：

$$\phi_e = \phi + \varphi$$

将方程 7 代入到方程 3 中有：

$$A(\phi+\varphi)+b=0$$

$$A\varphi+(A\phi+b)=0$$

现在，使用方程 5 和方程 9 可以得到：

$$A\varphi+d=0$$

这是根据初始细化层面算子 A 和误差 d 的校正方程。假如局部（高频）误差在精细层面已经充分消除，就可以在下一个较粗糙的层面光滑校正 y 并更有效的解决问题。

限制和延拓

在粗化层面解校正方程需要将精细层面（限制）的误差转移过来，还需要计算校正方程，然后再将校正结果从粗化网格层面（延拓）传回来。粗化层面校正 y^H 可以写为：

$$A^H\varphi^H+Rd=0$$

其中 A^H 是粗化层面算子，R 是限制算字，负责将精细层面的误差传到粗化层面。根据更新之后的精细层面解可以给出方程 1 的解为：

$$\phi^{new}=\phi+P\varphi^H$$

其中 P 是延拓算子，用于将粗化层面的校正传给细化层面。

非结构多重网格

在非结构网格中使用多重网格的主要困难在于粗化网格的创建和使用。在结构网格中，可以通过简单的从精细网格中移去每隔一个的网格线来得到粗化网格而且限制和延拓算子很容易用公式表示出来（如：注入和双线性插值）。

FLUENT 中使用两种多重网格方法分开的方式克服了在非结构网格上应用多重网格的困难。迄今为止所讨论的基本原则和多重网格循环一节中讨论的循环策略是相同的，限制、延拓和粗化网格算子的建构技巧是不同的，具体在代数多重网格（AMG）和全近似存储（FAS）多重网格两节中分别讨论了 AMG 和 FAS 方法。

译者注：

多重网格法基本原理

微分方程的误差分量可以分为两大类，一类是频率变化较缓慢的低频分量；另一类是频率高，摆动快的高频分量。一般的迭代方法可以迅速地将摆动误差衰减，但对那些低频分量，迭代法的效果不是很显著。高频分量和低频分量是相对的，与网格尺度有关，在细网格上被视为低频的分量，在粗网格上可能为高频分量。

多重网格方法作为一种快速计算方法，迭代求解由偏微分方程组离散以后组成的代数方程组，其基本原理在于一定的网格最容易消除波长与网格步长相对应的误差分量。该方法采用不同尺度的网格，不同疏密的网格消除不同波长的误差分量，首先在细网格上采用迭代法，

当收敛速度变缓慢时暗示误差已经光滑，则转移到较粗的网格上消除与该层网格上相对应的较易消除的那些误差分量，这样逐层进行下去直到消除各种误差分量，再逐层返回到细网格上。

目前两层网格方法从理论上已证明是收敛的，并且其收敛速度与网格尺度无关[哈克布思，1988]。 多重网格法是迭代法与粗网格修正的组合，经过证明，迭代法可迅速地将那些高频分量去掉，粗网格修正则可以帮助消除那些光滑了的低频分量，而对那些高频分量基本不起作用。

在多重网格计算中，需要一些媒介把细网格上的信息传递到粗网格上去，同时还需要一些媒介把粗网格上的信息传递到细网格上去。限制算子 $I^{ih}_{(i-1)h}$ 是把细网格 i-1 层上的残余限制到粗网格 i 层上的算子，最简单的算子是平凡单射，另外还有特殊加权限制；插值算子 $I_{ih}^{(i-1)h}$ 是把粗网格 i 层上的结果插值到细网格 i-1 层上的算子，一般采用线性插值或完全加权限制算子。

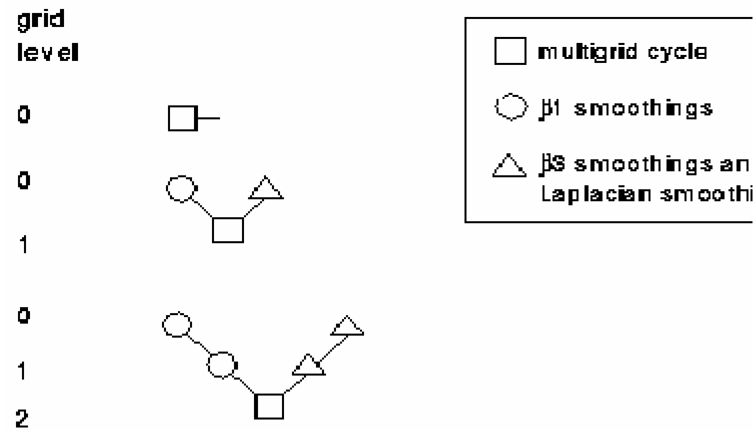
需要说明的是在多重网格迭代方法中，粗网格修正之前，细网格必须进行光滑迭代，以消除高频误差，使粗网格修正最有效地发挥其作用；在粗网格修正之后，不可避免的引入高频误差，所以也必须进行光滑迭代，不过高频误差能很快的通过光滑迭代消除。

Multigrid Cycles

多重网格循环可以定义为在每一个网格层面通过网格层次时在网格层面内应用的递归程序。FLUENT 中有四种多重网格循环：V，W，F 以及灵活("flex")循环。V 和 W 循环可以用在 AMG 和 FAS 中，F 和灵活循环只限用于 AMG 方法。（W 和灵活 AMG 循环由于要花费大量的计算而不可用于解耦合方程组。）

The V and W Cycles

下面两个图分别是 V 和 W 多重网格循环（定义如下）。在每一个图中，多重网格循环被描述为正方形，然后被扩展来表示循环内执行的个别步骤。当你读下面的步骤时，你可能想要遵循图中所描述的步骤。



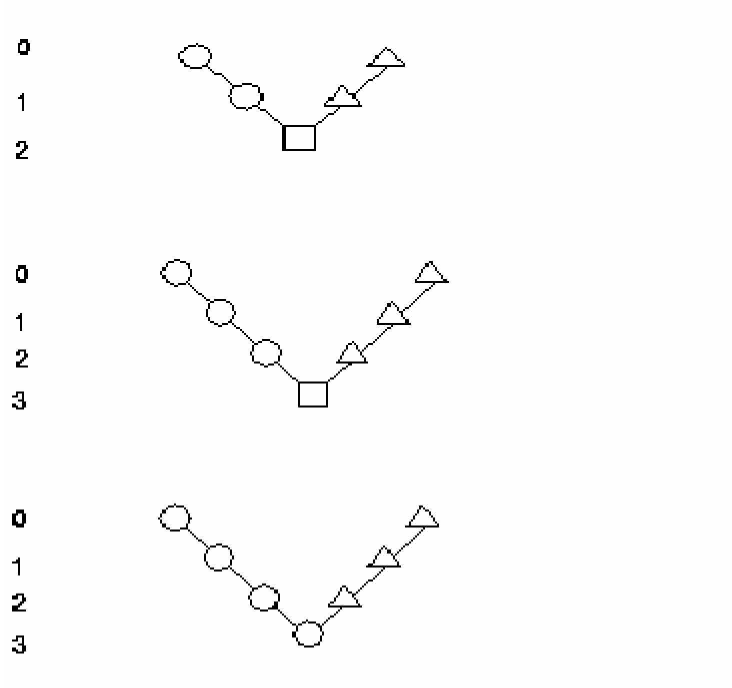


Figure 1: V 循环多重网格

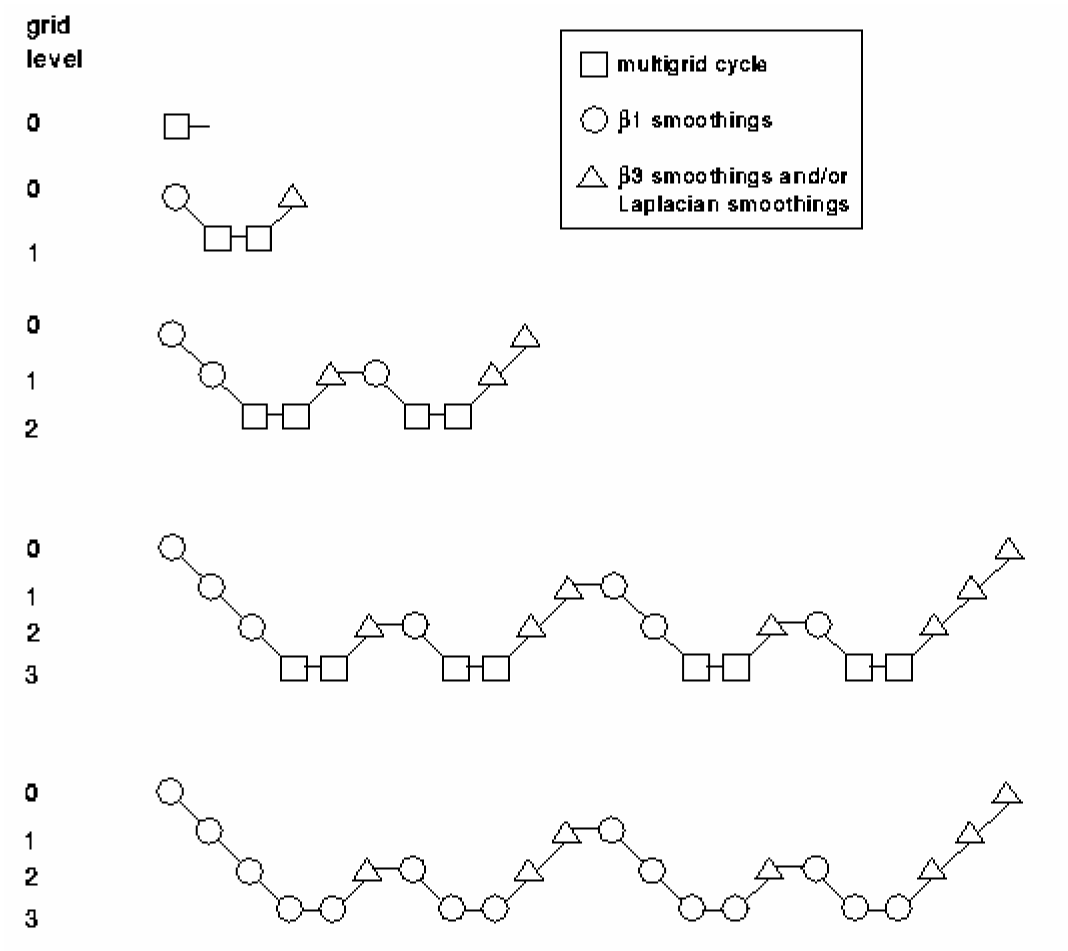


Figure 2: W 循环多重网格

对于 V 和 W 循环，各个层面的转换由三个参数控制：b_1，b_2 和 b_3：

1. b_1“滤波”（有时称为预松弛扫描），在当前网格层面进行滤波减少误差（当地误差）的高频部分。

在图 1 和 2 中，这一步被描述为一个循环，并标记了多重网格循环的起点。误差的高频分量必须减小直至所剩下的误差在下一个较粗糙的网格中没有明显的混淆现象。

如果这是最粗糙的网格层面，在这个层面的多重网格循环就结束了（在图 1 和 2 中有 3 个粗糙网格层，所以描述层面 3 多重网格循环的四边形等价于每一个图中最后一个图表的循环）

注意：在 AMG 方法中 b_1 的默认值是 0（即：没有预松弛）。

2. 接着就是用适当的限制算子将问题限制映射到下一个粗糙网格层面。

在图 1 和 2 中，从精细网格限制映射到较粗糙网格层面用向下的斜线来表示。

3. 通过执行 b_2 多重网格循环可以减少粗化网格的误差（在图 1 和 2 中用四边形表示）。通常说来，对于固定的多重网格策略，b_2 是 1 或者 2，分别对应 V 循环和 W 循环多重网格。

4. 然后，使用适当的延拓算子，在粗化网格上积累的校正用内插替换返回到精细网格并加到精细网格解中。

在图 1 和 2 中，延拓算子用斜向上的线来表示。

现在在精细网格层面上出现了高频误差，这个误差是由于延拓程序使用传递矫正而造成的。

5. 在最后一步，执行 b_3 光滑（后松弛）来去掉 b_2 网格循环在粗糙网格中引进的高频误差。

在图 1 和 2 中，松弛程序用一个三角形表示。

注意：在 FAS 方法中，在这一步中使用显式格式中的拉普拉斯光滑算子，校正又会被进行光滑处理，b_3 的默认值是零（也就是说，不进行这种光滑处理）；在最精细的网格层面的循环结束处从来不进行 b_3 光滑。

代数多重网格(AMG)

我们将会看到，这一算法之所以被称为代数多重网格格式，主要是因为粗糙层面方程的生成不需要在粗糙层使用任何几何图形或者重新离散；这一功能使得在使用非结构网格时 AMG 尤其有用。优点在于：不必创建或者存储粗糙网格，而且不需要在粗糙层面估计任何流量或者源项。这一方法和 FAS （有时被称为几何学的）多重网格方法形成鲜明对比，在 FAS 方法中需要网格的层级，和每一个层面的离散方程。。从理论上说，FAS 优于 AMG 方法的地方在于，对于非线性问题前者可以做得更好，这是因为系统的非线性可以通过重新离散传到粗糙层面；当使用 AMG 时，一旦系统被线化，直到细化层面算子被更新，求解器才会“感觉到”非线性。

AMG 限制和延拓算子

这里所使用的限制和延拓算子是基于附加校正（AC）策略的，结构网格的附加校正是由 Hutchinson 和 Raithby[68]描述的。层间的传递是用分段线性插值和延拓完成的。任何粗化层面单元的缺点由细化层面包含的缺点的总和给出的，通过注入粗化层面的值来获取细化层面的校正。在这种方式中，延拓算子由限制算子的转置给出。

$$P = R^T$$

限制算子是用细化层面单元粗化或者分组到粗化层面单元来定义。在这个过程中，每一个细化层面的单元用一个或者更多的最强相邻网格来分组，对当前未分组的相邻网格优先选择。这个算法尝试将单元集中到成组的固定尺寸中，一般是二或者四组，但是可以指定任何数。在分组的前后关系中，最强是指当前单元 i 的相邻单元 j 的系数 A_ij 是最大的。对于成组的耦合方程，A_ij 是一个块矩阵，它的大小的度量被简单的看成第一个单元的大小。除此之外，对于给定单元的一组耦合方程被一起处理，而且在不同的粗糙单元中不再划分。这样，就对系统中的每一个方程产生了相同的粗化。

AMG 粗糙层面算子

使用 Galerkin 方法来建构粗化层面算子 A^H。在这里，当转移到粗化层面时，与细化层面解有关的缺陷必须消除。因此我们可以写出：

$$Rd^{new} = 0$$

在双重时间步中的方程 5 和限制和延拓中的方程 3 的基础上替换 d^new 和 f^new 可以得到：

$$R\left(A\phi^{new} + b\right) = 0$$

$$R\left[A\left(\phi + P\varphi^{H}\right) + b\right] = 0$$

现在重新整理和使用双重时间步一节中的方程 5 有：

$$RAP\varphi^{H} + R\left(A\phi + b\right) = 0$$

$$RAP\varphi^{H} + Rd = 0$$

比较限制和延拓一节中的方程 1 和方程 5 可以得到下面的粗化层面算子的表达式：

$$A^{H} = RAP$$

因此，粗化层面算子的建构减少到所有精细层面单元的对角线与组中的相应对角线下面的块之和来形成该组粗化单元的对角线块。

F 循环

多重网格 F 循环本质上是 V 和 W 循环的结合。

多重网格循环是一个递归程序，该程序通过在当前层面完成单一网格循环来扩展到下一个粗糙网格层面。参阅 V 和 W 循环一节中的图 1 中的 V 和 W 循环以及图 2 中的 V 和 W 循环我们可以看出，F 循环就是用 0-1 层循环（每一个图中的第二个图表）程序来替换当前层（描述单一循环）的方块。可以看出，V 循环包括：

$$\beta_1 smooth \rightarrow restrict \rightarrow Vcycle \rightarrow prolongate \rightarrow \beta_3 smooth$$

W 循环包括：

$$\beta_1 smooth \rightarrow restrict \rightarrow Wcycle \rightarrow Wcycle \rightarrow prolongate \rightarrow \beta_3 smooth$$

F 循环则是用 W 循环之后进行 V 循环来构成：

$$\beta_1 smooth \rightarrow restrict \rightarrow Wcycle \rightarrow Vcycle \rightarrow prolongate \rightarrow \beta_3 smooth$$

正如预料的那样，F 循环比 V 循环需要更多的计算，但是比 W 循环花费要少一些。但是它的收敛性比 V 循环要好，大致和 W 循环的收敛性差不多。对于耦合求解器设置来说，F 循环是默认的 AMG 循环类型。

灵活循环

对于灵活循环，使用粗化网格的计算由下图中所示的逻辑控制多重网格程序来实现。这一逻辑控制可以保证当前层面的网格的残差减小速度足够慢时就会调用较粗糙网格的计算。除此之外，当当前粗糙网格层上的校正迭代解充分收敛而且因此应该转到下一层精细网格时，多重网格控制会做出适当的处理。这两个判断由下图中所示的两个参数 a 和 b 来控制。详细请参阅下面内容。注意多重网格程序的逻辑是这样的：在某一方程上的单一全局迭代过程中，可能会重复处理网格层面。例如：对于 4 层多重网格，其中包括 0，1，2，3 四层，解给定输运方程的灵活多重网格程序可能会按这样的顺序处理网格层面：0-1-2-3-2-3-2-1-0-1-2-1-0：

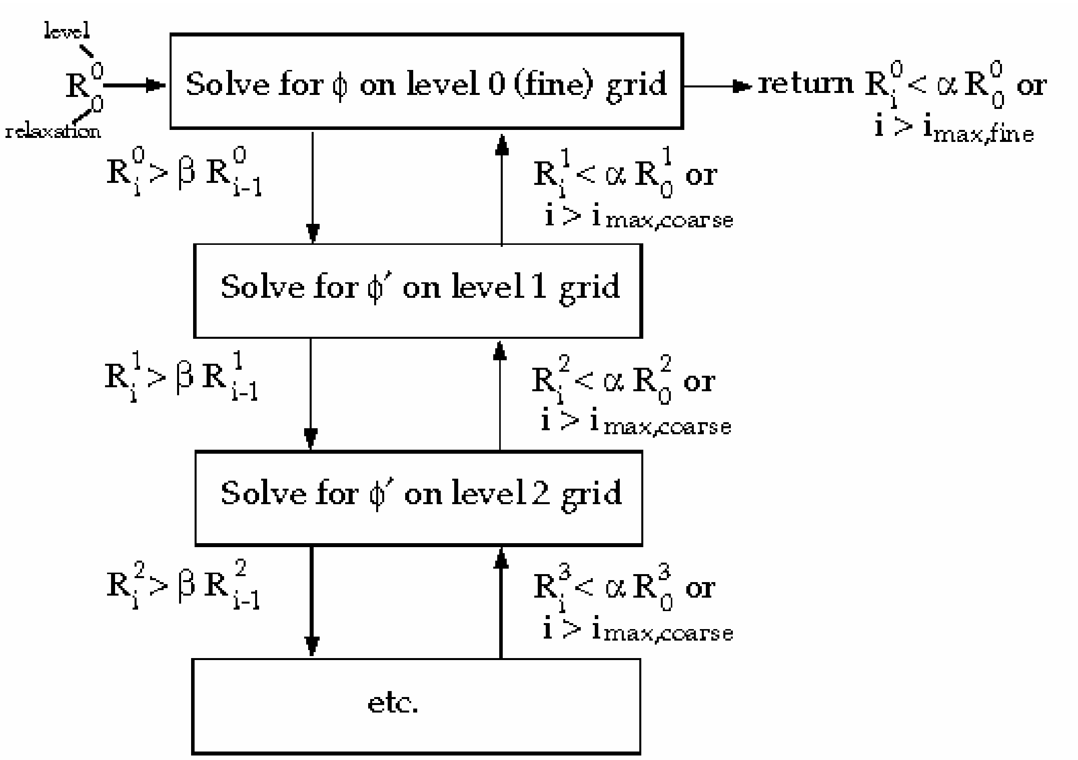


Figure 1 灵活多重网格的逻辑控制

灵活循环和 V，W 循环之间的主要区别是：灵活循环会通过残差减小的公差和终止判据的满足情况来确定什么时候，按什么样的频率来处理每一层网格，而 V 和 W 循环则明确定义了各个层面之间的转换模式。

当当前层面的误差减小速度不够快时，多重网格程序就会调用下一个网格层面的计算，具体判断公式如下：

$$R_i > \beta R_{i-1}$$

其中，R_i 是在当前层面经过第 i 步迭代之后从当前网格层面计算出的残差和的绝对值。上面的公式表明，如果经过 i 步迭代后迭代解的残差比某一分数 b（在 0 和 1 之间）大，就需要处理下一个粗化网格层面了。因此 b 被称为残差减小公差，用于确定什么时候放弃当前

网格层面的迭代解，并转移到下一个更粗糙的网格上解校正方程。B 的值控制了处理的粗化网格层面的频率。默认值是 0.7。如果 b 的值较大，就会处理较小的频率，反之亦然。

假定残差减小速度足够块，校正方程会在当前网格层收敛，这样就可以转到下一个更精细的网格层面计算。

当校正解的误差减小到该网格层初始误差的某一分数 a（在 0 和 1 之间）时，当前网格层上的校正方程就可以被认为是充分收敛了。

$$R_i < \alpha R_0$$

其中，R_i 是在当前层面经过第 i 步迭代之后从当前网格层面计算出的残差。R_0 时在当前全局计算中该网格层面最初获得的残差。参数 a 被称为终止判据，默认值是 0.1。注意，上面的方程也用于多重网格程序中最低（最精细）网格层面的终止计算。因此，继续在每一个网格层面（包括最精细的网格层面）进行松弛，直到满足该方程的判据（或者直到完成最大的迭代步，而所指定的判据还没有实现）。

全近似格式(FAS)多重网格

FLUENT 中 FAS 形成多重网格层级的方法是将精细网格的成组单元结合起来形成粗化网格单元。如下图所示，粗化网格单元是用节点周围的单元聚束形成的。根据网格的拓扑结构的不同，这一方法可以形成不规则网格和不定的表面数。但是，网格层面的简单创建和植入也就对应了简单的延拓和松弛算子。

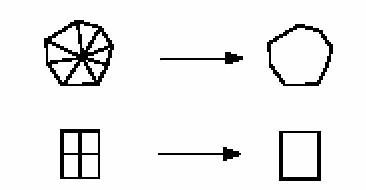


Figure 1: 节点聚束形成粗化网格单元

有趣的是，虽然粗化网格单元看起来很不规则，但是在单元表面上还是看不到锯齿状的结构。离散只使用单元表面的区域映射，因此将两个不规则外形单元分开的每组锯齿状单元表面，在二维问题中等价于连接锯齿单元终点的一条直线，在三维问题中等价于从不规则但连续的几何形状映射而来的区域。这种优化方法减少了所需的内存和计算时间。

FAS 限制和延拓算子

FAS 既需要精细网格解 f 的限制又需要其残差 d（误差）的限制。这个用于将解传到下一个较粗糙的网格层面的算子是用全近似格式构成的[22]。也就是说，取精细网格单元上解的体积平均值来得到粗糙单元的解。粗糙网格上的残差等于植入的精细网格单元内的残差之和。

通过简单的设定精细网格校正为与其相关的粗糙网格的值，我们构建了用于将校正传到细化层面的延拓算子 P。

粗糙网格校正 y^H 是从粗糙层面 f^H 计算得到的解和限制到粗糙层面 Rf 的初始解之间的差值计算得到的，它产生于粗糙层面并被应用于精细层面解。因此精细层面解的校正变成：

$$\phi^{new} = \phi + P\left(\phi^H - R\phi\right)$$

FAS 粗化层面算子

FAS 粗化网格算子是很简单的，它源于粗糙层面网格上控制方程的再离散。因为在离散一节中出现的离散方程和耦合求解器对组成单元的很多表面不加限制，所以在由不规则外形单元组成的粗糙网格上进行的再离散不存在问题。

当在不规则粗糙网格单元上使用有限体积格式时会丢失一些精度，但是因为多重网格解的精度主要有最精细的网格决定，所以解的精度不会受到粗糙网格离散的影响。

为了保持精细网格解的精度，我们修改了粗糙层面方程来包括源项[72]，这就保证了如果精细网格 d^h 上的残差为零，那么在粗糙网格 f^H 上计算得到的校正也会是零。因此，粗糙网格方程用公式表示为：

$$A^H \phi^H + d^H = d^H(R\phi) - Rd^h$$

其中，d^H 是从当前粗糙网格解 f^H 中计算得到的粗糙网格残差，d^H(R f)是从限制的精细层面解 R f 计算得到的粗糙网格残差。起初，这两项是相同的（因为在初始时我们有 f^H = R f），删除这两项化简上面的方程可得：

$$A^H \phi^H = -Rd^h$$

所以当细化网格残差 d^h 为零时就不会有粗化层面校正了。

求解器使用概述

当你确定了模型和求解器（参阅使用求解器形式一节），你就可以运行求解器了。下面是你可以参阅的一般步骤：

1. 选择离散格式，如果使用分离求解器，你还可以选择压力插值格式（见选择离散格式一节）。
2. （只用于分离求解器）选择压力速度耦合方法（参阅选择压力速度耦和方法一节）。
3. 设定亚松驰因子（见设定亚松驰因子一节）。
4. （只用于耦合显式求解器）打开 FAS 多重网格（见打开 FAS 网格一节）。
5. 对求解器设定作任何附加的修改，具体的修改可以参阅介绍你所使用的模型的相关章节。
6. 初始化解（参阅初始化解一节）
7. 激活适当的解监视器（参阅监视解的收敛一节）。
8. 开始计算（参阅执行计算一节）。
9. 如果出现收敛性问题，请尝试收敛性和稳定性一节中所讨论的方法。

前三项的默认设定可以满足大多数问题而不必修改。下面将要介绍这三个以及其它解参数可以做什么样的修改，以及什么时候你希望做出修改。上面所列出的步骤应用于所有定常状态的计算。具体可以参阅非定常解程序的时间相关模拟。

选择离散格式

FLUENT 允许你选择每一个控制方程的对流项的离散格式（对于粘性项自动使用二阶精度）当使用分离求解器时，在默认的情况下，所有的方程都是使用一阶迎风离散来解对流问题。当使用耦合求解器时，在默认的情况下，流动方程是二阶格式解出的，其它方程是用

一阶格式解出的。关于 FLUENT 中离散格式的完全介绍请见离散一节。

除此之外，当你使用分离求解器时，你可以指定压力插值格式，有关压力插值格式的相关内容可以参阅前面的介绍。

一阶与二阶的比较

当流动和网格成一条线时（如：矩形网格或者六面体网格模拟矩形导管的层流流动），可以使用一阶迎风离散格式。但是，当流动和网格不在一条线上时（即：流动斜穿网格线）一阶对流离散增加了对流离散的误差（数值耗散）。。对于三角形和四面体网格，流动从来就不会和网格成一条线，此时一般要使用二阶离散来获取更高精度的结果。对于四边形或者六面体网格，如果使用二阶离散格式，尤其是对于复杂流动来说，你可以获取更好的结果。

总而言之，一阶离散一般会比二阶离散收敛得好，但是精度要差，尤其是对于三角形或者四面体网格精度更差。关于控制收敛性的信息请参阅收敛性和稳定性一节。

对于大多数情况，你可以在计算的开始使用二阶格式。对于有些情况，你应该以一阶离散开始计算，在进行了初步迭代之后再转到二阶格式。例如，如果你解高马赫数流动问题，初始解科所预期的解相差较大，你就应该先用一阶格式迭代几步然后打开二阶格式继续计算直至收敛。

对于与网格成一条线的简单流动（如：划分为矩形网格或者六面体网格的矩形导管的层流流动），数值耗散自然会很低，所以一般使用一阶格式替代二阶格式而不损失精度。

最后，如果你使用二阶格式遇到收敛性问题，你就应该尝试使用一阶格式。

幂率和 QUICK 格式

对于旋转和涡流来说，如果你使用四边形或者六面体网格，QUICK 离散格式会比二阶格式产生更为精确的结果。但是，一般说来二阶格式已经足够了，QUICK 格式也未必会提高多少精度。

我们还可以选择幂率格式，但是一般说来它不会比一阶格式精确多少。

选择压力插值格式

如压力插值格式所述，当使用分离求解器时我们可以采用很多压力插值格式。对于大多数情况，标准格式已经足够了，但是对于特定的某些模型使用其它格式可能会更好：

- 对于具有较大体积力的问题，推荐使用体积力加权格式。
- 对于具有高涡流数，高 Rayleigh 数自然对流，高速旋转流动，包含多孔介质的流动和高度扭曲区域的流动，使用 PRESTO!格式。

注意：PRESTO!只能用于四边形或者六面体网格。

- 对于可压流动推荐使用二阶格式。
- 当其它格式不适用时，使用二阶格式来提高精度（如：对于流过具有非六面体或者非四边形网格的曲面边界的流动）。

用户输入

你可以在解控制面板（如下图）中指定离散格式，如果是使用分离求解器还可以选择压力插

值格式。菜单：Solve/Controls/Solution...。

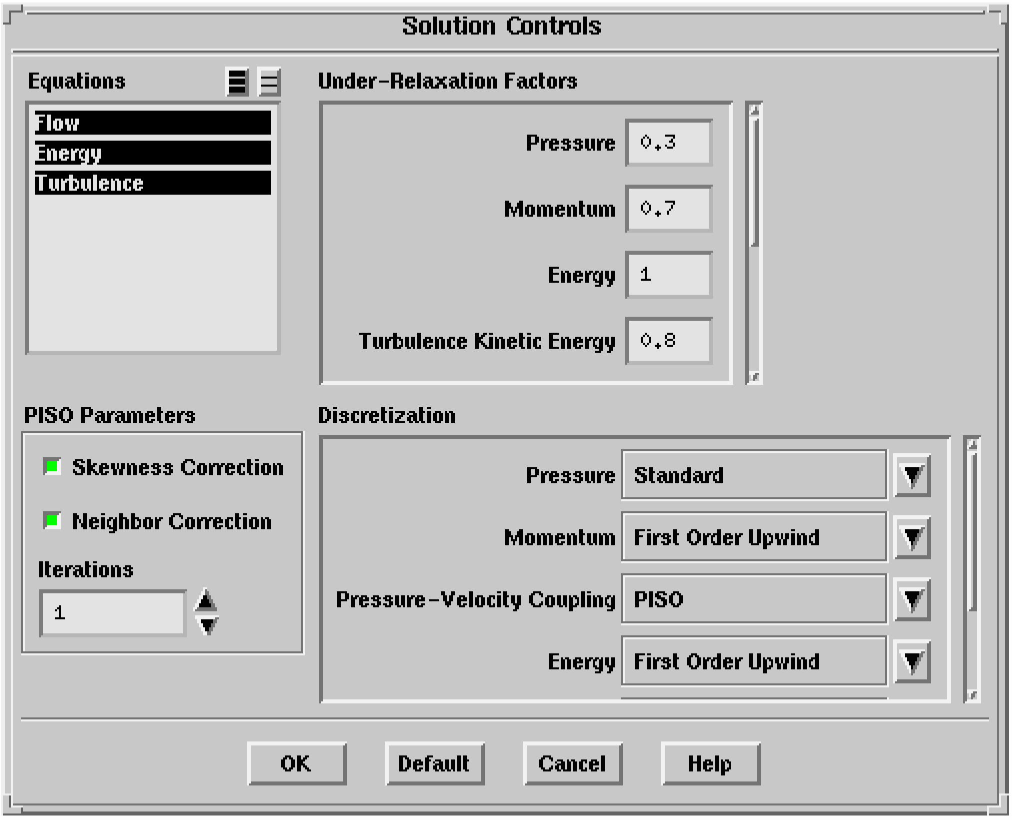


Figure 1: 分离求解器的解控制面板

在离散框下面列出的每一个标量方程（对于分离求解器，有动量、能量、湍流动能、能量等，对于耦合求解器，有湍流动能、湍流耗散速度）中，你可以在下拉列表中选择一阶迎风、二阶迎风、幂率或者 QUICK 格式。对于耦合求解器的流动方程（其中包括动量和能量），你既可以选择一阶迎风也可以选择二阶迎风格式。上面的面板是分离求解器对应的面板。

如果你使用分离求解器，在离散框中的压力后面的下拉列表中选择压力插值格式。你可以选择标准、线性、二阶、体积力权重或者（只用于四边形或六面体网格）PRESTO!。

如果你要改变离散的设定，但是你要回到 FLUENT 求解器默认的设定中修改，你可以点击默认按钮。此时所有的设定都改为默认设定，同时默认按钮就会变成重置按钮。要改回设定，你可以点击重置按钮。

选择压力速度耦合方法

在分离求解器中，FLUENT 提供了压力速度耦和的三种方法：SIMPLE，SIMPLEC 以及 PISO。定常状态计算一般使用 SIMPLE 或者 SIMPLEC 方法，对于过渡计算推荐使用 PISO 方法。PISO 方法还可以用于高度倾斜网格的定常状态计算和过渡计算。需要注意的是压力速度耦合只用于分离求解器，对于耦合求解器你不可以使用它。

SIMPLE 与 SIMPLEC 比较

在 FLUENT 中，可以使用标准 SIMPLE 算法和 SIMPLEC（SIMPLE-Consistent）算法，默认是 SIMPLE 算法，但是对于许多问题如果使用 SIMPLEC 可能会得到更好的结果，尤其是可以应用增加的亚松驰迭代时，具体介绍如下。

对于相对简单的问题（如：没有附加模型激活的层流流动），其收敛性已经被压力速度耦合所限制，你通常可以用 SIMPLEC 算法很快得到收敛解。在 SIMPLEC 中，压力校正亚松驰因子通常设为 1.0，它有助于收敛。但是，在有些问题中，将压力校正松弛因子增加到 1.0 可能会导致不稳定。对于这种情况，你需要使用更为保守的亚松驰或者使用 SIMPLE 算法。对于包含湍流和/或附加物理模型的复杂流动，只要用压力速度耦合做限制，SIMPLEC 会提高收敛性。它通常是一种限制收敛性的附加模拟参数，在这种情况下，SIMPLE 和 SIMPLEC 会给出相似的收敛速度。

PISO

对于所有的过渡流动计算，强烈推荐使用 PISO 算法邻近校正。它允许你使用大的时间步，而且对于动量和压力都可以使用亚松驰因子 1.0。对于定常状态问题，具有邻近校正的 PISO 并不会比具有较好的亚松驰因子的 SIMPLE 或 SIMPLEC 好。

对于具有较大扭曲网格上的定常状态和过渡计算推荐使用 PISO 倾斜校正。

当你使用 PISO 邻近校正时，对所有方程都推荐使用亚松驰因子为 1.0 或者接近 1.0。如果你只对高度扭曲的网格使用 PISO 倾斜校正，请设定动量和压力的亚松驰因子之和为 1.0（比如：压力亚松驰因子 0.3，动量亚松驰因子 0.7）。如果你同时使用 PISO 的两种校正方法，推荐参阅 PISO 邻近校正中所用的方法。

用户输入

你可以在解控制面板（如下图）中指定压力速度耦合方法。菜单：Solve/Controls/Solution...。

在离散框下面的压力速度耦合下拉菜单中选择 SIMPLE，SIMPLEC 或者 PISO。

如果你选择 PISO，面板就会扩展到 PISO 参数设定面板。在默认的情况下，倾斜校正和邻近校正都是打开的。如果你只想使用一种校正，你可以关闭适当的选项。默认的迭代数为 1，你不必修改这个值。

用户输入

设定亚松驰因子

如亚松驰一节所述，分离求解器使用亚松驰来控制每一步迭代中的计算变量的更新。这就意味着，使用分离求解器解的方程，包括耦合求解器所解的非耦合方程（湍流和其他标量）都会有一个相关的亚松驰因子。

在 FLUENT 中，所有变量的默认亚松驰因子都是对大多数问题的最优值。这个值适合于很多问题，但是对于一些特殊的非线性问题（如：某些湍流或者高 Rayleigh 数自然对流问题），在计算开始时要慎重减小亚松驰因子。

使用默认的亚松驰因子开始计算是很好的习惯。如果经过 4 到 5 步的迭代残差仍然增长，你就需要减小亚松驰因子。

有时候，如果发现残差开始增加，你可以改变亚松驰因子重新计算。在亚松驰因子过大时通常会出现这种情况。最为安全的方法就是在对亚松驰因子做任何修改之前先保存数据文件，并对解的算法做几步迭代以调节到新的参数。最典型的情况是，亚松驰因子的增加会使残差有少量的增加，但是随着解的进行残差的增加又消失了。如果残差变化有几个量级你就

需要考虑停止计算并回到最后保存的较好的数据文件。

注意：粘性和密度的亚松驰是在每一次迭代之间的。而且，如果直接解焓方程而不是温度方程（即：对 PDF 计算），基于焓的温度的更新是要进行亚松驰的。要查看默认的亚松弛因子的值，你可以在解控制面板点击默认按钮。

对于大多数流动，不需要修改默认亚松弛因子。但是，如果出现不稳定或者发散你就需要减小默认的亚松弛因子了，其中压力、动量、k 和 e 的亚松弛因子默认值分别为 0.2，0.5，0.5 和 0.5。对于 SIMPLEC 格式一般不需要减小压力的亚松弛因子。在密度和温度强烈耦合的问题中，如相当高的 Rayleigh 数的自然或混合对流流动，应该对温度和/或密度（所用的亚松弛因子小于 1.0）进行亚松弛。相反，当温度和动量方程没有耦合或者耦合较弱时，流动密度是常数，温度的亚松弛因子可以设为 1.0。

对于其它的标量方程，如漩涡，组分，PDF 变量，对于某些问题默认的亚松弛可能过大，尤其是对于初始计算。你可以将松弛因子设为 0.8 以使得收敛更容易。

用户输入

你可以在解控制面板中修改亚松驰因子 (Figure 1).。菜单：Solve/Controls/Solution...。

你可以在亚松弛因子的每一个方程名字后面设定相关的亚松弛因子。

注意：如果你使用分离求解器，所有的方程都有相关的亚松弛因子。如果你使用某一耦合求解器，只有在后面解出的方程油压松弛因子。

如果你改变了亚松弛因子，但是你现在想要回到 FLUENT 的默认设定，你可以点击默认按钮。此时 FLUENT 会将亚松弛因子改回到默认值，相应的默认按钮变成了重置按钮。要将设定改回你就可以点击重置按钮。

改变 Courant 数

对于 FLUENT 的耦合求解器，对时间步进格式的主要控制是 Courant 数（CFL）。时间步和 CFL 是成比例的，如显示格式的方程 3 的定义。

线性稳定性理论确定了 CFL 的允许值的范围（即：给定数值格式保持稳定的范围）。当你指定了一个允许的 CFL 值，FLUENT 会用显示格式一节中的方程 3 计算出适当的时间步。一般说来，时间步越大收敛越快，所以在允许的范围内将 CFL 设定越大越好。

耦合隐式和显式求解器的稳定性极限是相当不同的。显式求解器有更大的限制范围，需要比隐式求解器更小的 CFL 设置。关于这两种求解器 CFL 的选择会在下面两节中讨论。

耦合显式求解器的 Courant 数

线性稳定性分析表明，耦合显式求解器中使用的多步格式所允许的 CFL 依赖于步的数量以及粘性和耗散项的更新频率（参阅改变多步格式一节）。但是，一般说来，你可以假定多步格式对于 Courant 数达到 2.5 时是稳定的。由于控制方程的非线性，在实际中这个稳定性限制通常是较低的。

耦合显式求解器的默认 CFL 为 1.0，但是对于一些二维问题你可以增加它。一般说来你不可以使用高于 2.0 的 CFL 数。

如果解是发散的，也就是说残差增加的很快，而且你的问题设定和初始化都没有错误，那么这个时候通常需要减小 Courant 数。根据启动条件的精确性不同，你可以将 CFL 减小到 0.1 至 0.5 来开始计算。一旦启动的瞬时现象减弱，你就可以再开始增加 Courant 数了。

耦合隐式求解器的 Courant 数

线性稳定性理论表面，耦合隐式求解器中使用的点 Gauss-Seidel 格式是无条件稳定的。但是，和显式求解器一样，控制方程的非线性常常限制了稳定性条件。

耦合隐式求解器默认的 CFL 为 5.0。根据你的问题的复杂性不同，你通常可以将 CFL 增加到 10，20，100 甚至更高。你会发现，在问题解算开始启动时需要较小的 CFL（在启动时，解的变化是高度非线性的），但是在后面的计算中就可以逐渐增加 CFL 了。

耦合 AMG 求解器可以在给定的迭代中检测多重网格循环的收敛性。如果出现问题，它会自动减小 CFL 并重新迭代，同时向屏幕输出一个消息。五次尝试来成功完成迭代。成功完成当前迭代之后，CFL 返回到初始值，迭代程序继续进行所需的计算。

用户输入

Courant 数在解控制面板中设置（如下图），菜单：Solve/Controls/Solution...。

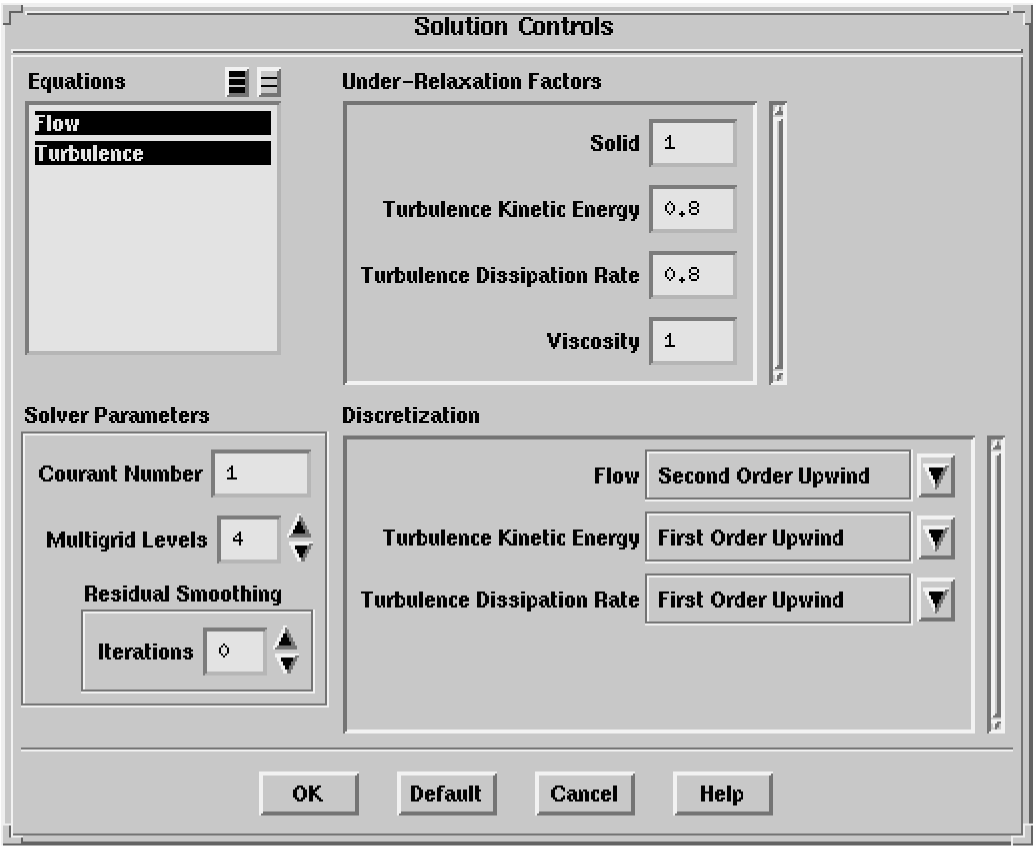


Figure 1: 耦合显式求解器的解控制面板

在解参数框中输入 Courant 数的值。需要注意的是，上面的面板是耦合显式求解器对应的面板。对于耦合隐式求解器，解参数框中只有 Courant 数一项。

当你在求解器面板中选择耦合显式求解器，FLUENT 会自动设置 Courant 数为 1；当你选择耦合隐式求解器时，Courant 数会自动变成 5。

打开 FAS 多重网格

如双重时间步进一节中所讨论的，FAS 多重网格选项是耦合显式求解器的可选组件（默认情况下，AMG 多重网格总是打开的）。因为在几乎所有的耦合显式计算中，如果使用 FAS 多重网格收敛加速器都会很有用的，因此在开始计算之前通常你都应该设定粗化网格层面是一个非零值。对于大多数问题，你只需要设定 FAS 多重网格参数。如果遇到收敛性困难，你可以考虑应用一下设定 FAS 多重网格参数一节所讨论的方法。

注意：对于显式时间步进，你不能使用 FAS 多重网格，这是因为粗糙网格校正会破坏精细网格解的时间精度。

设定粗糙网格层

如全近似存储（FAS）多重网格一节所述，FAS 多重网格在较粗糙的网格层面较好的解决问题，然后将校正解传回到原始的精细网格，因此增加了解的传播速度，并加速收敛。控制多重网格求解器最为基本的方法就是指定所使用的粗糙网格层数。

如全近似存储多重网格一节中所解释的那样，粗糙网格是通过将一组相邻的精细单元聚束成一个粗糙单元形成的。最优的网格层数是和问题相关的。对于大多数问题，你可以以 4 或 5 层开始计算。对于大的三维问题，因为粗糙网格层需要附加的内存，所以虽然内存限制可能不让你使用更多的层面，你可能还是要加上更多的层面。如果你确信多重网格会导致收敛性困难，你可以减少层数。

如果 FLUENT 在达到你所要求的网格层面之前已经到了只有一个单元的粗糙网格，它就会在这里结束。也就是说，如果你设定了 5 个网格层面，但是第四层就只有一个单元了，那么 FLUENT 就只创建 4 层，因为第 4 层和第 5 层一样。

要指定你所要的网格层数，在解控制面板（用户输入的图 1）的解参数下设定多重网格层数。菜单：Solve/Controls/Solution...。

你可以在多重网格控制面板的 FAS 多重网格控制中设定最大粗化层。菜单：Solve/Controls/Multigrid...。

在某一个面板中改变粗糙网格层数会自动更新其它面板中网格层数的显示。

当你第一次开始迭代时，粗糙网格层就被创建了。如果你想要检查每一层内有多少个单元，请求一个迭代，然后使用菜单 Grid/Info/Size（在网格尺寸一节介绍）列出每一个网格层面的尺寸。如果你觉得满意，可以继续计算，如果不满意你可以改变粗糙网格层面的数量然后再检查。

对于大多数问题，一旦你设定了适当的粗糙网格层数，你不需要修改任何附加的多重网格参数。你可以简单的继续你的计算直至收敛。

设定解的限制

为了控制极端条件下解的稳定性，FLUENT 提供了保持解在某一个可接受范围内的限制。你可以用解限制面板（下图）来控制这些限制。菜单：Solve/Controls/Limits...。

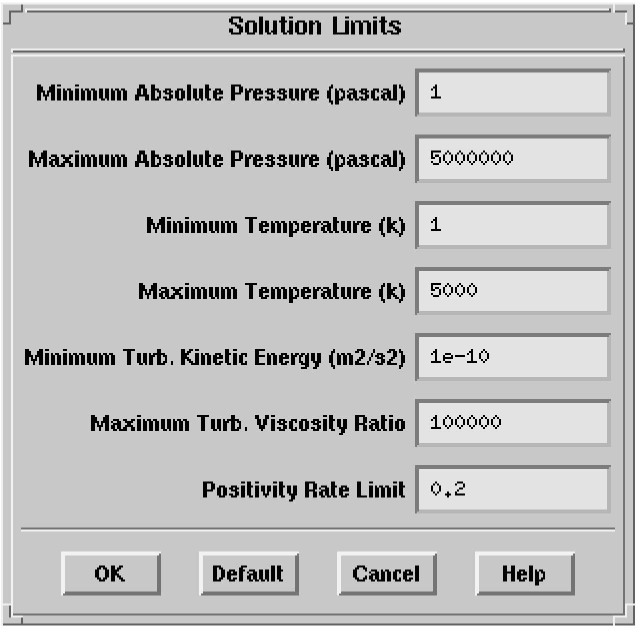


Figure 1:解限制面板

FLUENT 对压力、温度和湍流量应用了限制值。这些限制的目的就是为了保证在计算中，绝对压力或者温度不是零、负值或者过大，并保证湍流量不会过大。FLUENT 还对温度的减小速度作了限制，以避免温度变为零或者负值。

注意：一般说来你不需要改变默认的解的限制。如果压力，温度或者湍流量被重复地重置到限制值，控制台窗口就会出现适当的警告消息，此时你需要检查尺寸，边界条件和属性以确保问题的设定正确，并找出问题中变量为零或如此之大的原因。你可以用标记功能（用于适应中标记单元）来辨别哪个单元的值等于所设定的限制。（用等值适应面板，具体参阅等值适应一节。）在很稀少的情况下，你可能需要改变解的限制，但是如果要这样做的话，你必须清楚求解器会有这种非常情况的原因。比方说，你可能知道流域内温度超过 5000K。如果你要将温度的极限设置超过 5000K，要确定任何温度相关属性对于这么高的温度都被适当的定义。

限制解变量的值

绝对压力的最小最大值限制在最小最大绝对压力框中显示。如果 FLUENT 所预测的一个压力值小于最小绝对压力或者大于最大绝对压力，求解器就会用相应的极限值取代预测值。对于能量计算中的温度也做相似处理。

最大的湍流粘性比和最小湍动能用于限制湍流计算。如果计算预测的 k 值小于最小湍动能，FLUENT 就会用相应的极限值取代预测值。对于粘性比限制，FLUENT 使用与层流粘性有关的流场的最大湍流粘性(C_m k^2 / e)来作限制。如果 FLUENT 计算出的比率超出限制值，就会通过将 e 限制到必要值来将比率设定为极限值。

限制温度减小的速度

在 FLUENT 耦合求解器中，温度的减小速度由正向速度极限来控制。例如，默认值为 0.2 就意味着两次迭代之间的温度不可以减少超过 20%。如果温度的改变超过这个极限，求解器就会将时间步减小从而将变化改回原来的范围，同时会输出时间步减小的警告。（这个

减小的时间步会被用于单元内所有的解变量而不仅仅是温度。）温度的快速减小就意味着温度可能变成负值。重复的时间步减小警告说明你的问题设定出了问题。如果不再出现时间步减小警告，计算可能已经从时间不减少警告中恢复了正常。

重新设置解的限制

如果你改变并保存了某一个解的极限值，但是现在你想回到 FLUENT 设定的默认值，你可以重新打开解限制面板并点击默认按钮。FLUENT 会将限制值改回默认的设定，同时默认按钮会变成重置按钮。要讲你的值改回，你可以点击重置按钮。

解的初始化

在开始 CFD 模拟之前，你必须为 FLUENT 提供一个流场解的初始猜测。在很多情况下，你必须格外小心以保证所提供的初始解能够允许求解器最后获得所需要的解。例如：在现实的超音速风洞中，如果背压低于操作压力，这个风洞就无法正常启动，因为里流动会在喉部阻赛而不会过渡到超声速。对于数值模拟也一样，流动必须初始化为超声速流否则一样会阻塞而保持亚声速流动。

解的初始化有两个方法：

- 全流场初始化（在所有单元中）
- 为选定单元区域或者单元的“寄存器”中选定的流体变量修补数值或函数。（寄存器和适应中的用于标记单元的功能一样）。

注意：在选定单元中修补初始值之前，你必须首先初始化全流场。然后你可以在选定变量的初始值的基础上修补新的数值。

全流场初始化

在开始计算之前或者对选定单元中选定的初始值进行修补之前，你必须首先对全流场进行初始化。解初始化面板允许你设定流动变量的初始值，并用这些值对解进行初始化。菜单：Solve/Initialize/Initialize...。

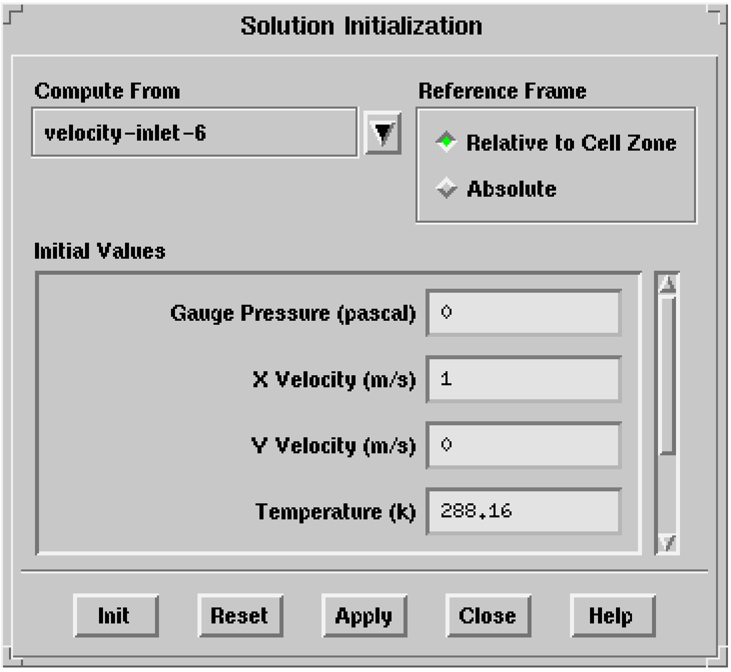


Figure 1: 解初始化面板

你可以在指定的区域内的信息中计算出数值，手动输入它们，或者让求解器在所有区域的基础上计算平均值。你也可以标明所指定的速度值是绝对的或者相对于每一个单元区域的。初始化的步骤如下：

1. 设定初值：

- 要初始化流场，请在从……计算的下拉列表中选择区域名，然后用特定的区域设置的值来完成初始化。在初始值标题下面的所有值都会被自动计算和更新，这个计算和更新是基于定义在所选区域基础中的条件上的。
- 要用计算的平均值初始化流场，请在从……计算下拉列表中选择所有区域选项。FLUENT 会在所有边界区域中定义的条件的基础上计算和更新初始值。
- 如果你希望改变一个或者更多的值，你可以在适当的变量框中手动输入新的数值。如果你愿意手动输入所有值，你可以在从……计算的下拉列表中不选择任何区域。

2. 如果你的问题包括移动参考系或者滑动网格，你可以在参考系框中选择绝对或者相对单元区域来标明初始速度是绝对速度或者相对每一个单元区域的运动的速度。如果所解的问题中没有区域运动，这两个选项是等价的。FLUENT 中速度初始化的默认参考系是相对参考系。如果解在你的大多数区域中是旋转的，使用相对选项可能比绝对选项更好一些。
3. 如果你对面板中显示的初始值满意，你就可以点击初始化按钮（Init）来初始化全流场了。如果已经存在解的数据，比如说你已经进行了一些计算或者对解作了初始化，你必须确认要覆盖掉原来的数据。

保存和重置初始值

当你点击初始化按钮对解进行初始化之后，初始值就被保存了。如果你想以后重新初始化解，当你重新打开这个面板时，你会在面板中发现校正值。如果你想现在就定义初始值，但是你还没有准备初始化解，你可以参阅全流场初始化中的说明来设定数值然后点击应用（Apply）按钮而不是初始化（Init）按钮。这样的操作会保存当前的显示值但是不会初始化

解。你可以在以后返回到面板来执行初始化操作。

如果你一不小心选错了区域或者手动设定了不正确的值，你可以使用重置按钮来将所有的流场重置到所保存的值。每次面板打开，在执行从……计算之前和初始化（Init）或应用（Apply）执行之后都会保存所设定的值。

Patching Values in Selected Cells

一旦你初始化或者计算了全流场，你就可以为不同单元中特定的变量修补不同的值。例如，如果你有多重流体区域，你可能想要在不同的区域修补不同的温度值。你也可以选择修补自定义流场函数（用自定义流场函数计算面板定义的）而不是修补一个常数值。如果你修补速度，你可以标明所指定的值是绝对速度或者相对于单元区域的速度。所有的修补操作都在下面的面板中进行。菜单：Solve/Initialize/Patch...。

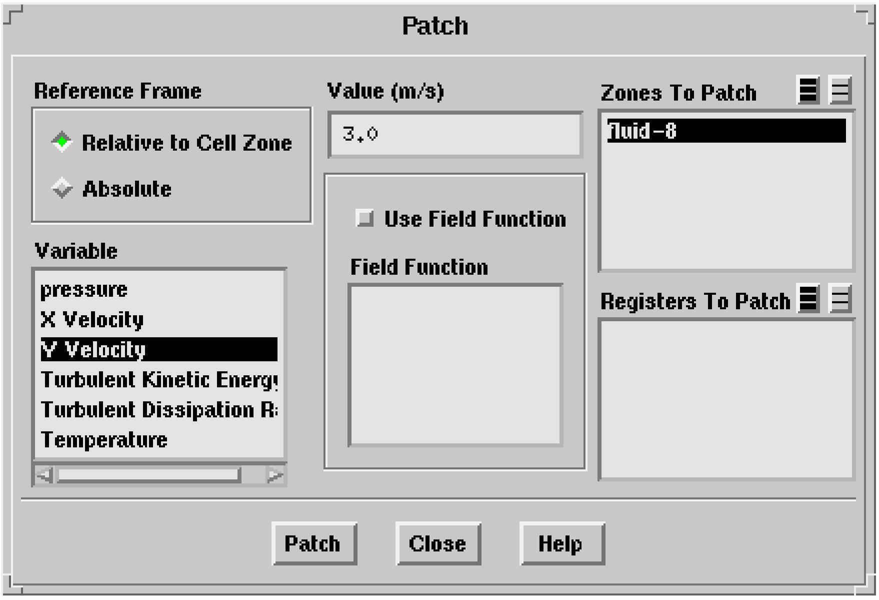


Figure 1: 修补面板

1. 在变量列表中选择要修补的变量。
2. 在 Zones To Patch 和/或 Registers To Patch 列表中选择你想要对所选变量修补数值的一个或多个区域和/或寄存器。
3. 如果你想要简单的修补一个常数值，只需要在数值框中输入相应数值就可以了。如果你想要修补先前定义的流场函数，请打开使用流场函数选项然后在流场函数列表中选择适当的函数。
4. 如果你在变量列表中选择了速度，而且你的问题包括移动参考系或者滑动网格，你可以在参考系框中选择绝对或者相对于单元区域来标明你所修补的速度是绝对速度还是相对于所选择的每一个单元区域的运动的速度（如果所解决的问题中没有区域运动，这两个选项是等价的）FLUENT 中默认的速度修补参考系是相对参考系。如果解在你的大多数区域中是旋转的，使用相对选项可能比绝对选项更好一些。
5. 点击修补按钮更新流场数据（注意：修补不会对迭代或者时间步计数有影响）。

使用寄存器

在单元寄存器中进行修补可以使我们灵活的在一个单元区域内修补不同的值。例如，你

可能对某一组分只在具有特定浓度范围的流体单元内修补某一个特定值。你可以用适应中用于标记单元的功能创建一个单元寄存器（基本上是单元的一个列表）。这些功能允许你在物理位置，单元体积，梯度或者某一特定变量的等值线以及其它参数的基础上标记单元。关于适应中标记单元的信息请参阅网格适应一章。管理适应寄存器提供了关于操纵不同的寄存器创建新的寄存器的相关信息。一旦你创建了一个寄存器，你就可以用在选择的单元中修补数值一节中所介绍的方法来修补数值。

使用流场函数

通过使用自定义流场函数计算器定义你自己的流场函数，你可以在选定的单元中修补一个非常数数值。例如，你可能要修补一个通过流体区域的变化组分质量分数。使用这个功能，简单的创建自定义流场函数中介绍的函数，然后在修补数值中的 1 在选定的单元内进行函数修补操作，具体可以参阅在选定单元内修补数值一节。

在以后的解过程中使用修补功能

因为修补操作只影响你选择改变数值的变量，而不影响剩下的流场，所以你可以在以后的解过程中使用它不丢失任何计算的数据。（另一方面，初始化会将所有的数据重置到初始值。）例如，你可能需要从一个温度较低的解开始燃烧计算。你可以简单的读入或者计算温度较低的数据，然后在适当的单元修补一个较高的温度，再继续计算。

当你使用 Step-by-Step 解过程一节中介绍的 step-by-step 技巧解决问题时，修补也是很有用的。

执行计算

你需要使用迭代面板（如下图）来请求解的过程的开始。菜单：Solve/Iterate...。

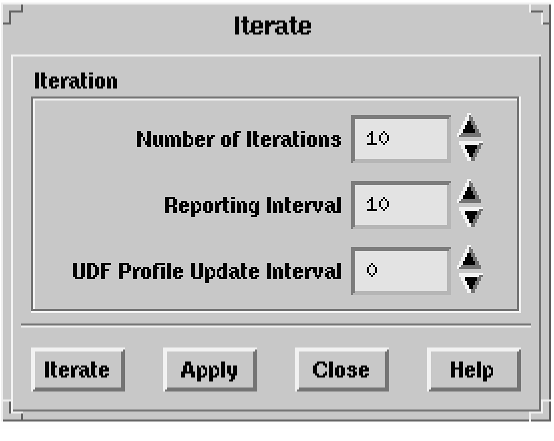


Figure 1: 迭代面板

在这个面板中，你需要在迭代次数框中提供大量的附加迭代次数（对于非定常计算输入，请参阅时间相关模拟一节）。如果还没有任何计算开始执行，FLUENT 会使用初始解在迭代 1 开始计算。如果你从当前的解数据开始计算，FLUENT 会在开始点处使用当前解数据从执行过的最后一次迭代开始。

在默认的情况下，FLUENT 会在每一次迭代之后更新收敛监视器（参阅监视解的收敛一节）。如果你增加了报告的时间间隔（默认为 1），你可以减少得到报告的频率。例如，如

果你设定报告的时间间隔为 2，监视器会在每个一个迭代中打印或者绘制报告。注意：报告的间隔也是指 FLUENT 监测解是否收敛的频率。例如，如果你的解在 40 步迭代之后收敛，但是你的报告间隔是 50，FLUENT 会在监测到收敛之前继续计算 10 步迭代。

当你点击迭代按钮，FLUENT 就开始计算了。在迭代中会显示一个工作对话框。点击取消按钮或者在 FLUENT 控制台窗口中键入<Control-C>，只要安全停止，都会中断迭代（更详细的信息请参阅中断迭代一节）。

更新 UDF 轮廓

如果你使用自定义函数（UDF）来定义任何边界条件，属性等，你可以通过修改 UDF 轮廓更新间隔的数值来控制函数的更新间隔。在默认的情况下，每经过一次迭代函数都会被重新估值。如果轮廓计算花费较大，你可能想要增加这个数值。关于 UDF 的创建和使用你可以参阅自定义函数一节。

中断迭代

如执行计算一节所提到的，在求解器计算时，你可以在工作对话框中点击取消按钮来中断计算。除此之外，在大多数情况下（并不是所有情况）计算机系统允许你使用控制序列，通常是<Control-C>，来中断计算。这一功能允许你在处理剩下的迭代请求之前停止计算程序。

重置数据

当你执行完某些迭代之后，如果你决定从第一步迭代重新开始（比如说你对问题的设定作了一些修改），你可以用解初始化面板重新初始化解，具体用法可以参阅全流场初始化一节。

监视解的收敛

在解算过程中，我们可以通过检查残差、统计、力的数值和曲面积分等参数来动态监视收敛性。我们可以以报告的方式或者图表的方式输出解变量的参数，具体可以处理的参数包括升力、阻力、力矩系数、曲面积分和残差。对于非定常流动，我们还可以监视已经过去的时间。下面具体介绍一下每一个监视的功能。

监视残差

在每一步迭代之后，求解器就会将每一个守恒变量的残差计算出来并保存，这样就相当于记录了收敛的历史。求解器会将这些历史记录保存在数据文件中。至于残差是如何定义的，需要注意哪些问题，请参阅下面两节：分离求解器残差的定义、耦合求解器残差的定义。

如果假定计算机是具有无限精度的，那么解收敛也就意味着残差是零。实际的计算机都是具有有限精度的，所以当残差减小到某些较小值（截断）就不再变化了("level out")。对于单精度计算（工作站和大多数计算机的默认情况），在达到截断之前，残差可以减小六个量级。双精度残差可以减小十二个量级。关于判断收敛的原则可以参阅判断收敛性一节。

分离求解器残差的定义

离散之后，一般变量 f 在单元 P 中的守恒方程可以写成：

$$aP\phi P=\sum_{nb}a_{nb}\phi_{nb}+b$$

其中 a_P 是中心系数，a_nb 是邻近单元的影响系数，b 是源项 S= S_c + S_P f 的常数部分 S_c 和边界条件的贡献。在方程 1 中，

$$aP=\sum_{nb}a_{nb}-Sp$$

由 FLUENT 分离求解器计算的残差 R^f 是在所有计算单元 P 中方程 1 总和的不平衡。这是指非标度的残差。可以写成：

$$R^{\phi}=\sum_{cells}\left|\sum_{nb}a_{nb}\phi_{nb}+b-aP\phi P\right|$$

一般说来，很难从方程 5 定义的残差来判断收敛性，因为它是未标度的。尤其是在封闭的流动中，如空间内部的自然对流问题，在这个空间中没有 f 的入口流动速度来和残差比较。FLUENT 使用代表 f 通过区域的流动速度作为标度因子来标度残差。标度的残差定义为：

$$R^{\phi}=\frac{\sum_{cells}p\left|\sum_{nb}a_{nb}\phi_{nb}+b-aP\phi P\right|}{\sum_{cells}p\left|aP\phi P\right|}$$

对于动量方程，分母项 a_P f_P 由 a_p v_p 替换，其中 v_p 是单元 P 上的速度大小。

如收敛性判断一节所述，标度的残差对于大多数问题来说就比较适合判断收敛性了。这个残差是 FLUENT 默认的显示。需要注意的是，这个残差定义对于结构网格求解器 FLUENT 4 也是适用的。

对于连续性方程，分离求解器未标度的残差定义为：

$$R^{c}=\sum_{cells}p\left|rate\quad of\quad mass\quad creation\quad in\quad cell\quad P\right|$$

分离求解器连续性方程的标度残差定义为：

$$\frac{R^{c}_{iteration\quad N}}{R^{c}_{iteration\quad 5}}$$

分母是前五步迭代中连续性残差的最大值。

上面所介绍的标度残差很适合用于判断收敛性。关于它们使用的原则可以参阅收敛性判断一节。在计算中确定残差减少多少来作为收敛性的附加度量常常是很有用的。为了实现这一目的，FLUENT 允许你对残差实行标准化，标准化的方法就是将残差除以 M 步迭代之后残差的最大值，其中的 M 你可以在残差监视面板迭代框中的标准化框中设定。

$$\overline{R}^{\phi}=\frac{R^{c}_{iteration\quad N}}{R^{c}_{iteration\quad M}}$$

这样的标准化保证了所有方程的初始残差都是 1 的小量 O(1)因此在判断所有的收敛性时有

时是很有用的。

在默认的情况下，M = 5。你也可以在残差监视设定面板中手动设定标准化因子（方程 13 种的分母）。

耦合求解器残差的定义

耦合求解器的残差就是守恒变量（W）随时间的变化速度。RMS 残差是区域内每一个单元残差平方的均方根：

$$R(W)=\sqrt{\sum\left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)^2}$$

方程 1 是为 FLUENT 耦合求解器计算的耦合方程报告的非标度残差的总和。

耦合求解器在耦合方程组解完之后解附加标量方程时，对应的残差的定义是和分离求解器残差的定义一样的。如果你不记得了耦合求解器是如何解附加标量的请参阅耦合解方法一节。

一般说来，很难从方程 1 定义的残差来判断收敛性，因为它是未标度的。尤其是在封闭的流动中，如空间内部的自然对流问题，在这个空间中没有 f 的入口流动速度来和残差比较。FLUENT 使用代表 f 通过区域的流动速度作为标度因子来标度残差。标度的残差定义为：

分母是前五步迭代中残差绝对值的最大值。

上面所述的残差是判断解的收敛性的有用的指标。关于它们使用的原则可以参阅收敛性判断一节。在计算中确定残差减少多少来作为收敛性的附加度量常常是很有用的。为了实现这一目的，FLUENT 允许你对残差（标度的或者未标度的）实行标准化，标准化的方法就是将残差除以 M 步迭代之后残差的最大值，其中的 M 你可以在残差监视面板迭代框中的标准化框中设定。

$$\overline{R}(W)=\frac{R(W)_{iteration\quad N}}{R(W)_{iteration\quad M}}$$

这样的标准化保证了所有方程的初始残差都是 1 的小量 O(1)因此在判断所有的收敛性时有时是很有用的。

在默认的情况下，M = 5，使得标准化残差等于标度残差。你也可以在残差监视设定面板中手动设定标准化因子（方程 5 中的分母）。

使用残差监视器面板概述

控制残差监视的所有输入都是在残差监视面板中完成的（下图）。菜单：Solve/Monitors/Residual...或者菜单：Plot/Residuals...。

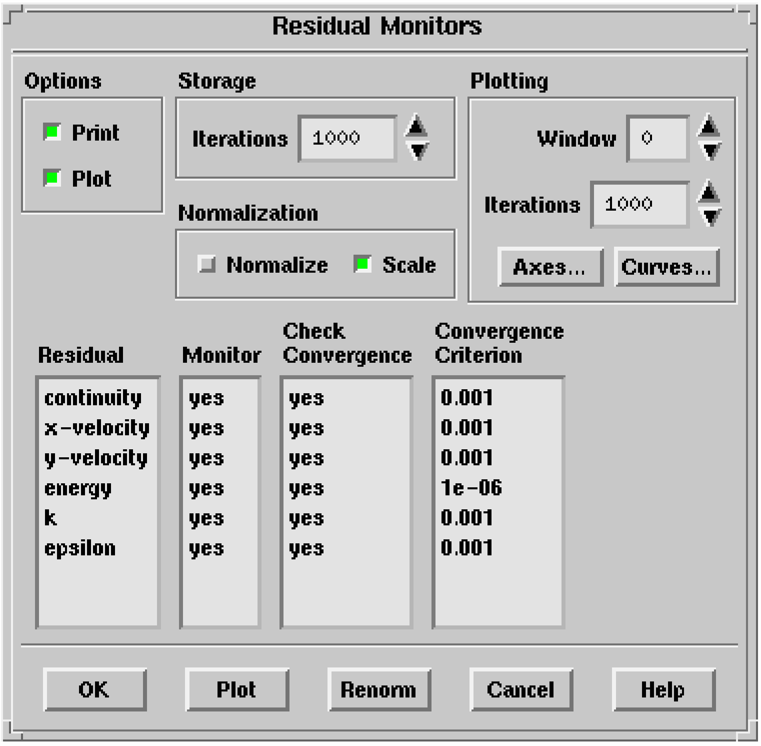


Figure 1: 残差监视面板

一般说来，你需要使用这个面板来激活残差绘制和修改收敛性判据。对于禁止某个特定残差的监视和修改标准化和绘图参数我们可以得到附加的控制。

打印和绘制残差图

在默认的情况下，所有相关变量的残差值都会在每次迭代之后被打印到文本（控制台）窗口。如果你想禁止这项打印输出，请在选项中关闭打印项。要激活每次迭代之后残差绘制功能，请在选项中打开绘图选项。此时残差会在计算时被绘制在图形窗口中（在窗口框中的窗口 ID）。

如果你想要显示当前残差历史记录的绘图，只需要点击绘图按钮。

修改收敛判据

除了在计算过程中绘制和打印残差值之外，FLUENT 还会检查收敛性。如果收敛性被监视了，当每个变量的指定收敛判据满足计算器就会自动停止计算。只有对于被监视残差的变量才可以被检查收敛性（也就是监视器的设定为 yes 的变量）。

你可以选择是否监视每一个变量的收敛性，具体操作方法就是在残差监视面板的检查收敛性列表中点击 yes 或者 no 来选择。当你点击 yes 之后,相应的按钮就会变成 no，反之亦然。

要对某一个特定的变量修改收敛性判据，请在收敛性判据列表中点击当前的变量。此时会打开残差监视设定面板（下图），这样你就可以在收敛判据框中设定新的数值。点击 OK 之后就将相应的修改之后的数值发送到残差监视面板。一定要记住在残差监视面板中点击 OK，否则不会保存相应的改变。

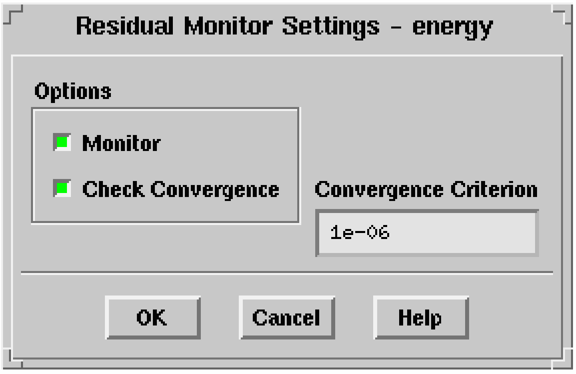


Figure 1: 残差监视设定面板

绘图参数

如果你选择绘制残差图（或者在街的进程中交互修改或者在计算之后使用绘图按钮），你可以修改几个显示选项。

在绘图的窗口框中，你可以指定需要绘图的窗口的 ID。在 FLUENT 迭代过程中，激活的绘图窗口临时设定为这个窗口来更新残差的绘图，然后返回到先前的数值。因此残差绘图可以保存在独立的窗口中而不会干涉其它的后处理图形。

通过改变绘图中的迭代输入，你可以改变绘图中显示的残差历史点的数目。如果你指定 n 个点，FLUENT 会显示最后 n 个历史点。因为 y 轴是用绘图中所有点的最大值和最小值标度的，你可以通过将迭代设定小于已经执行的迭代数来放大残差历史的端点，例如，如果你打开湍流计算，在计算中残差在前期跳跃，顶点就会放大所有的残差值的范围，这样就使得以后较小的波动几乎不能辨别了。通过设定迭代值来保证绘图不包括前期的跳跃，y 轴的范围更适合于观察你所感兴趣的数值。

你可以修改绘图轴和残差曲线的属性。点击 Axes...或者 Curves...按钮可以打开修改坐标轴属性或者修改属性的相关选项。具体可以参阅修改坐标轴属性和修改曲线属性两节。

取消监视

如果你的问题需要解很多方程（比如说：湍流量和多组分），包含所有残差的绘图可能会很难读入。在这种情况下，你可以选择只监视残差的子集，可能是那些影响收敛的主要因素。你可以在残差监视面板中的监视器列表中点击 yes 或者 no 来确定是否监视每一个残差。当你点击 yes 之后,相应的按钮就会变成 no，反之亦然。

控制标准化

在默认的情况下残差的标度（见前面的介绍）是激活的，而且能量和 P-1 方程的默认收敛判据是 10^-6，其它方程的收敛判据是 10^-3。残差标准化（参阅前面的介绍）也可以使用，但是在默认的情况下是关闭的。

标准化可以用于标度和未标度的残差。后者的结合（未标度但是进行了标准化）会回复到 FLUENT/UNS 3.2 和 RAMPANT 4 类型的残差报告。注意，如果标准化功能被激活的话，可能需要适当的调节收敛性判据。对于基于不同类型的残差报告的收敛性判断的信息可以参阅收敛性判断一节。（未经处理的残差和标度因子都被保存在数据文件中，这样你就可以在

标度和未标度残差之间进行转化了。要报告未标度残差，可以在标准化中关闭标度选项。

注意：如果你是用标准化残差并在标度和未标度残差之间进行转换（反之亦然），你必须点击 Renorm 按钮来重新计算标准化因子。

如果你需要对残差进行标准化，请在标准化下面打开标准化选项。此时标准化因子会被加到面板中。FLUENT 会对每一个变量对应的标准化因子打印或者绘制该变量的残差。默认的标准化因子是前五步迭代之后的最大残差值。要使用不同的步数之后的残差的最大值，你可以在标准化中修改迭代的输入。

在某些情况下，最大的残差值可能出现在残差框中指定的迭代之后。如果可能出现这种情况，你可以点击 Renorm 按钮将所有变量的标准化因子设定为残差历史记录中的最大值。相应的绘图和打印报告也会使用新的标准化因子。

你也可以明确地指定标准化因子。要对某一特定变量修改标准化因子，请在标准化因子列表中点击当前的值。此时就会打开残差监视设定面板，你可以在标准化因子框中设定新的数值。点击 OK 将改变的数值发送到残差监视面板中。一定要记住在残差监视面板中点击 OK，否则不会保存相应的改变。

如果你希望报告非标准化，非标度的残差，请在残差监视面板中标准化下面关闭标准化和标度选项。需要注意的是，不管所报告的残差是未标准化或者未标度的，非标准化和非标度残差都会保存在数据文件中。

存储残差历史记录点

每一个变量的残差历史记录自动保存在数据文件中，而不用管它们是否被监视。你可以改变存储下面的迭代输入来控制需要存储的历史点的个数，最多可以保存 1000 个点。如果执行的迭代步数超过 1000，那么求解器就会每个一个点丢弃一个——这样就只存储了 500 个历史点——接着存储下面的 500 点。如果有达到了 1000 个点，求解器会继续上面的操作。如果你执行的迭代数目极大，你需要关闭和开始计算有关的残差历史记录信息。在这种情况下，你需要将迭代增加到适当的值。当然，这个数越大，你所需要内存就更多，绘图的时间就越长，同时也就需要更多的磁盘存储空间来保存数据文件。

监视统计

如果解完全发展的周期性流动，你可能想要监视压力梯度或者体积温度比，具体可以参阅周期性流动和热传导一节。

当你解非定常流动，尤其是使用显式时间步进选项，你可能需要监视在计算中已经过去的时间。当你初始化流动时流场开始的物理时间是零（关于非定常流模拟的详细内容，请参阅时间相关模拟一节）。

你可以使用静态监视面板（下图）在计算中来打印或者绘制这些量。菜单：Solve/Monitors/Statistic...。

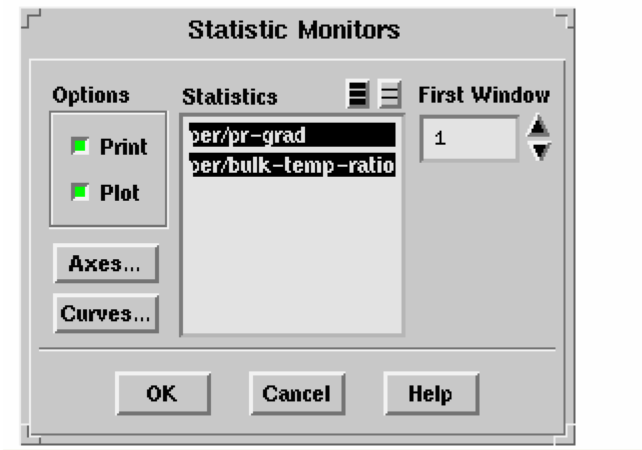


Figure 1: 统计监视面板

关于这个监视器的设定的程序如下：

1. 标明你所想要的报告的类型，具体方法是：对于打印输出打开打印选项，对于绘图打开绘图选项。你可以同时激活这些选项。
2. 在统计列表中选择适当的量。
3. 如果你要绘制这些量，你可以参阅绘图参数所介绍的方法来设定任何绘图选项。

绘图参数

如果你选择绘制统计，你可以修改几种显示参数。

在第一个窗口框中，你可以指定图形窗口的 ID，求解器会在这个窗口中绘图（如果你绘制不止一个量，求解器就会这个窗口中绘制第一个图）。在迭代过程中，激活的图形窗口会临时设定为这个窗口来更新绘图，然后返回到先前的值。因此统计绘图可以保持在独立的窗口中而不会干涉其它的后处理图形绘制。注意，你在统计列表中选择的附加量会绘制在 ID 增量的窗口中。

你可以修改绘图轴和残差曲线的属性。点击 Axes...或者 Curves...按钮可以打开修改坐标轴属性或者修改属性的相关选项。具体可以参阅修改坐标轴属性和修改曲线属性两节。

监视力和力矩

在每一步迭代之后，求解器可以计算并保存升力，阻力和/或力矩系数来创建收敛的历史记录。你可以打印和绘制这个收敛数据，也可以将它们保存到外部文件。FLUENT XY 图所写入的外部文件的格式在 XY 图文件格式一节介绍。例如：在计算外部空气动力学时或者对力尤其感兴趣时，监视力会很有用。有时候在残差降到三阶量级之前力就已经收敛了，所以比起只监视残差来说你可以提前停止计算来节省时间。（你还要确保检查质量流速和热传导速度来保证质量和能量的守恒，具体可以使用通过边界的流量一节介绍的流量报告面板来完成这个操作。）

注意：力和力矩系数是用参考值一节所介绍的参考值。具体就是：力系数使用参考面积、密度和速度，力矩系数是用参考面积、密度、速度和长度。

注意：只有处理过的力系数数据被保存起来。如果你决定改变任何控制力监视的参数，比如说参考值、力矢量、力矩轴或者壁面区域，你可能会在数据中看到不连续性：以前的数据没有被更新。通常说来如果你做出改变，你可能想要在继续迭代之前删除先前的力系数数据。

非定常流动计算中力的监视

如果你计算的是非定常流动，指定的力的报告是在每一个时间步之后更新而不是每一个迭代之后更新。所有力监视和相关设定的步骤的其它功能都不改变。

使用力监视面板概述

你可以是用力监视面板（下图）来打印、绘制和保存在指定壁面处升力、阻力和力矩系数的收敛性历史记录。菜单：Solve/Monitors/Force...。

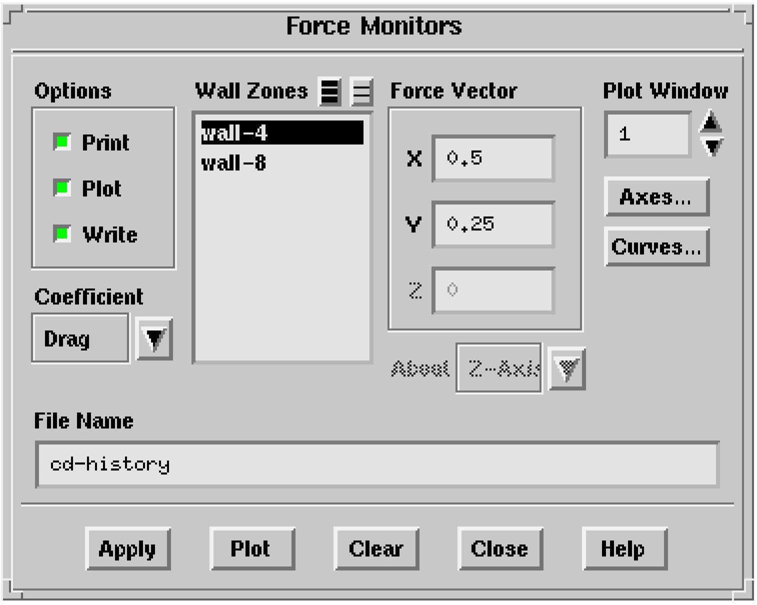


Figure 1: 力监视面板

在这个面板中，你需要标明你所要的报告的类型（打印输出、绘图或者文件），并指定哪个系数和壁面是你所感兴趣的。对于每一个被监视的系数会输入附加的信息。你也可以修改绘图参数。注意：在对于每一个系数报告作出所需要的修改之后一定要点击应用按钮。

指定力系数的报告

对于每一个你选择监视的系数，你需要在理监视面板中设定所有适当的参数并点击应用按钮。在迭代中你可以监视一个、两个或所有的（三个）系数（阻力、升力和力矩矢量分量）。当你选择所需的系数时，求解器会显示该系数当前的或者默认的面板设定。点击应用按钮就会将当前面板对所选系数的设定保存起来。

指定力系数报告的程序如下：

1. 在系数下拉列表中选择感兴趣的阻力、升力或者动量系数。
2. 在壁面区域列表中，选择需要计算系数的壁面区域。如果你所监视的是不止一个系数，每一个系数对应的所选择的壁面区域可能是相同的。然而，如果你需要，你可以在不同的区域中计算不同的系数。
3. 根据所选的系数不同，进行下面的步骤：

- 如果是监视阻力或者升力，在力矢量标题中输入力矢量 X、Y 和 Z 分量，沿着这些分量就会计算出力。只有在系数下拉列表中选择了阻力或者升力，才会出现力矢量标题，

在默认的情况下，阻力是在 x 方向上计算的，升力是在 y 方向上计算的。

- 如果你监视的是力矩系数，输入力矩中心的笛卡尔坐标，力矩就是参照这个中心计算出来的。只有在系数下拉列表中选择了力矩才会出现力矩中心标题。默认的力矩中心是(0,0,0)。你还需要指定你需要监视的力矩矢量分量。目前你一次只能监视一个力矩矢量分量。在 About 下拉列表中选择 X、Y 或者 Z 轴。(只有在系数下拉列表中选择了力矩这一列表才会被激活)对于二维问题只有关于 z 轴的力矩矢量存在。

4. 标明你所要报告的类型（打印输出、绘图或者文件），具体可以参阅下一节：打印、绘制和保存力系数的历史
5. 点击应用按钮，如果需要的话，对附加系数重复上述步骤。

打印、绘制和保存力系数的历史

有三种报告所选的力系数的方法。在力监视面板中的选项框中打开打印选项就可以在文本窗口（控制台）中打印系数值。要在绘图窗口中标明的图形窗口中绘制系数，打开绘图选项。要保存到文件，打开写入选项并指定文件名。你可以同时激活这三个选项中的任何几个选项的组合。

注意：如果你选择不讲力系数保存到文件，当你退出当前 FLUENT 进程时这些信息就会丢失。

如果你希望显示当前力系数历史的绘图，只需要点击绘图按钮。

如果你选择绘制力系数（或者在解过程中交互进行或者在计算完毕后使用绘图按钮），由几个显示参数是你可以修改的。

在绘图窗口框中，你可以指定图形窗口的 ID，求解器会在这个窗口中绘制每一个力系数的图（如果你绘制不止一个量，求解器就会这个窗口中绘制第一个图）。在迭代过程中，激活的图形窗口会临时设定为这个窗口来更新绘图，然后返回到先前的值。因此力系数绘图可以保持在独立的窗口中而不会干涉其它的后处理图形绘制。

你可以修改绘图轴和曲线的属性。相同的属性应用到所有力监视图中。点击 Axes...或者 Curves...按钮可以打开修改坐标轴属性或者修改属性的相关选项。具体可以参阅修改坐标轴属性和修改曲线属性两节。

丢弃力监视数据

如果你确定由力监视器所收集的数据没用（比如说，你重新开始计算或者改变某一参考值），你可以点击清除按钮来丢弃积累的数据。清除按钮会清除系数下拉列表中所选的系数的所有监视数据，包括相关的历史文件（文件名框中的名字也会被清除）。当你使用清除按钮，你需要在问题对话框中确认数据清除。这个操作只移除力监视数据，对于解数据没有影响。

监视曲面积分

在每一个求解器迭代或者时间步之后，去面上流场变量或函数的平均、质量平均、积分或者流速可以被监视。你可以打印或者绘制这些收敛数据，也将它们保存为外部文件。外部文件的格式和 XY 绘图文件格式一节所介绍的 FLUENT XY 绘图文件格式一样。

监视曲面积分可用于检查迭代收敛性和网格独立性。例如，你可以监视某一变量在曲面上的平均值。当这些值不再改变时，你可以停止迭代。然后你可以进行适应网格重新计算收

敛阶。如果在两次适应之间曲面上的平均值不再变化，就可以认为这些解是与网格无关的。

定义曲面监视器概述

你可以使用曲面监视面板（定义曲面监视器中的图 1）来创建曲面监视器并标明每一个历史是否即以什么时候被打印、绘制或者保存。定义曲面监视面板（定义曲面监视器中的图 2）是从曲面监视器面板中打开的，它允许你定义每一个监视器跟踪什么内容（即流场变量在一个或多个曲面上的平均、积分、流速或者质量平均）。

定义曲面监视器

你需要在曲面监视面板中开始曲面监视的定义程序（图 1）菜单：Solve/Monitors/Surface...。

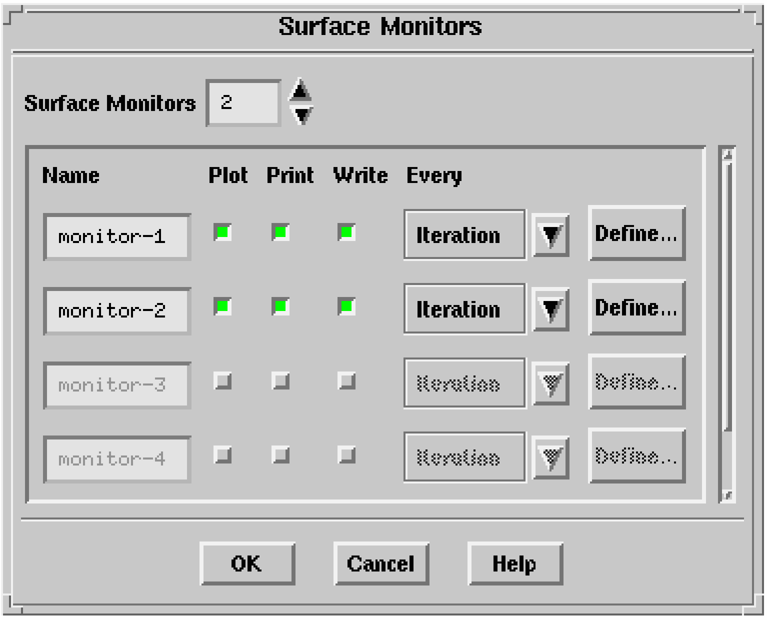


Figure 1: 曲面监视器面板

程序如下：

1. 增加曲面监视器值到你希望的曲面监视数量。当这个值被增加时，面板中的附加监视器输入就变成可编辑的了。对于每个监视器你需要执行下面的步骤。
2. 在名字标题中输入监视器的名字，并使用绘图、打印和写按钮来标明你所需要的报告（绘图、打印或者文件），具体可以参阅答应、绘制和保存区面积分历史一节。
3. 在 Every 下面的下拉列表中选择每一个迭代或者每一个时间步来标明你要在每一次迭代还是每一个时间步之后更新监视器。如果是非定常计算，时间步是唯一有效的选择。如果你指定为每一个迭代步，而且迭代面板中报告的间隔大于 1，监视器就会在每一个报告间隔中更新而不是每一步迭代中更新（例如，报告间隔是 2，监视器就会每隔一步迭代更新一次）。如果你指定每一个时间步，报告的间隔就不会有影响，监视器会在每一个时间步之后被更新。
4. 点击定义按钮打开定义曲面监视器面板（图 2）。因为这是模式面板，所以只有你执行了 5-10 步之后求解器才允许你进行操作。

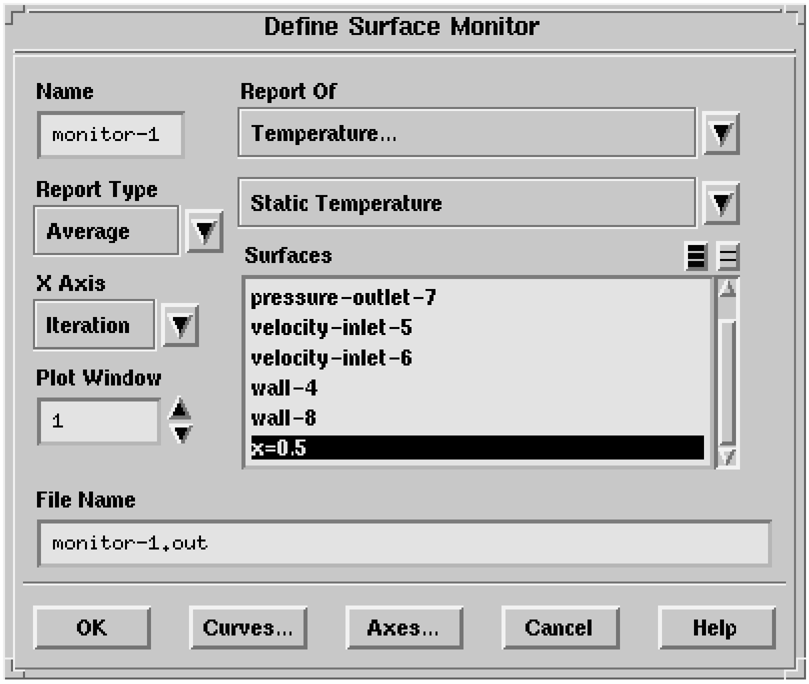


Figure 2: 定义曲面监视器面板

5. 在定义曲面监视器面板中选择曲面监视器的积分方法，你可以在报告类型下拉菜单中选择积分、平均、流速或者质量平均来实现方法的选择。这些方法在曲面积分一节介绍。
6. 在曲面列表中选择一个或多个你想要积分的曲面。
7. 在 Repor Of 下拉列表中指定需要积分的变量或者函数。首先在上面的下拉列表中选择所需要的类别，然后你可以在下面的列表中选择某一相关量（对于列表中变量的说明请参阅流场函数定义一节）。
8. 如果你对数据绘图或者将它们写入文件，请指定作为 x 轴或者数值使用的参数（y 轴/值对应监视数据）。在 X 轴下拉列表中选择迭代、时间步或者流动时间作为 x 轴函数，监视数据会依照它来打印或者绘制。如果是计算非定常流动，时间步和流动时间是唯一有效的选择。如果你选择时间步，绘图的 x 轴对应的是时间步，如果你选择流动时间，x 轴对应的是过去的时间。
9. 如果你在绘制被监视的数据，你可以指定图形窗口的 ID，求解器会在这个窗口中绘图。在迭代过程中，激活的图形窗口会临时设定为这个窗口来更新绘图，然后返回到先前的值。因此每一个曲面监视绘图都可以保持在独立的窗口中而不会干涉其它的后处理图形绘制。
10. 如果你在将监视数据写入文件，指定文件名。
11. 记住在曲面监视器面板中定义了所有曲面监视器之后点击 OK 按钮。

打印、绘制和保存曲面积分历史纪录

有三种报告曲面积分的方法。在曲面监视面板中的选项框中打开打印选项就可以在文本窗口（控制台）中打印曲面积分值。要在绘图窗口中标明的图形窗口中绘制积分值，打开绘图选项。要保存到文件，打开写入选项并指定文件名。你可以同时激活这三个选项中的任何几个选项的组合。

注意：如果你选择不将曲面积分保存到文件，当你退出当前 FLUENT 进程时这些信息就会丢失。

你可以为每一个曲面监视器绘图修改绘图轴和曲线的属性。对于适当的监视器，在定义曲面监视器面板中点击 Axes...或者 Curves...按钮可以打开曲面监视器的修改坐标轴属性或者修改属性的相关选项。具体可以参阅修改坐标轴属性和修改曲线属性两节。

22.17 解的动画显示

在计算过程中，你可以用 FLUENT 做等值线、矢量、XY 图、监视图（残差、统计、力、曲面或者体积）或者网格（主要对于动网格模拟有用）的动画。在开始计算之前，你需要指定要做动画的显示变量和绘图类型，并指定绘图保存的频率。在指定的间隔中，**FLUENT** 会显示被请求的绘图并存储每一个。完成计算之后，你可以回放动画序列，修改视角（对于网格、等值线和矢量的图），需要的话，可以可以将动画保存为一序列的硬拷贝文件或者 MPEG 文件。

下面几节将会介绍解动画序列的定义、回放和保存动画序列，读入先前保存的动画序列等内容。

22.17.1 定义动画序列

你可以使用解动画面板来创建动画序列并标明序列帧创建的频率。动画序列面板（下图）是从解动画面板打开的，它允许你定义每一个序列显示什么，在哪里显示以及每个帧如何存储。

你需要在解动画面板中开始动画序列的定义。菜单：**Solve/Animate/Define...**。

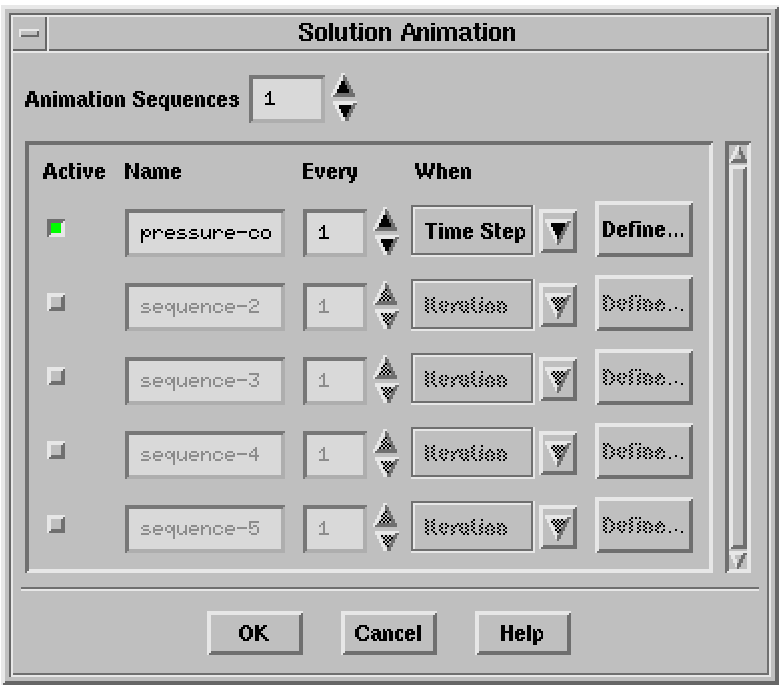


Figure 1 解动画面板

程序如下:

1. 增加动画序列值为你希望指定的动画序列数目。当增加这个值时，面板中附加的动画序列输入变成可编辑的。对于每一个序列，你需要执行下面的步骤。
2. 在名字标题中输入序列的名字。这个名字在回放面板中会作为辨别序列的依据。如果你将序列帧保存到磁盘，这个名字也用作文件名的前缀。
3. 你可以在 Every 下面设定迭代并在 When 下面的下拉列表中选择迭代或者时间步来标明在序列中所要创建新的帧的频率。其中时间步只是对非定常流才是有效的选择。例如，要创建每 10 个时间步的帧，你需要在 Every 下面输入 10 并在 When 下面选择时间步。
4. 点击 **Define...按钮打开动画序列面板（下图）**

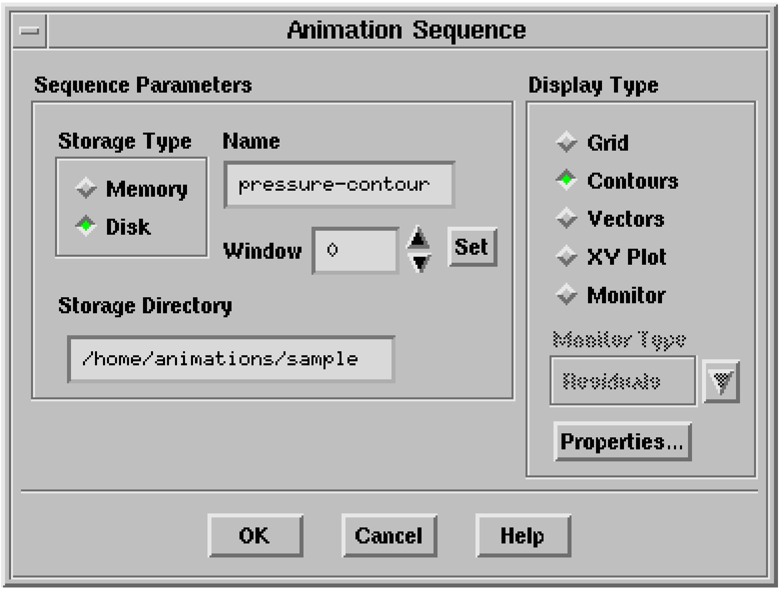


Figure1:动画序列面板

5. 在动画面板中定义序列参数

(a) 在存储类型下面选择内存或者磁盘来指定动画序列帧保存的类型。

!!注意：在动画序列中 FLUENT 的图元文件是为每一个帧创建的。这些文件包含了所有场景的信息而不只是在图形中显示的视角。因此这些文件会非常大。在默认的情况下，这些文件会保存在磁盘中。如果你不想占用磁盘空间来保存这些文件，你可以选择将它们保存在内存中。然而，将它们保存在内存中会减少求解器可以使用内存的数量。不过，将序列保存在内存中回放速度会比磁盘快

(b) 如果选择保存类型是磁盘，请在存储目录框中指定要保存的目录（这可以是相对路径也可以是绝对路径）。

(c) 在窗口框中指定你需要绘图的窗口的 ID，然后点击设定按钮（指定的窗口如果没有打开的话，现在就会打开）。

在迭代中，活动的图形窗口被设定为这个窗口来更新绘图。如果你希望每一个动画序列在不同的窗口中，你可以指定不同的窗口 ID。

6. 为序列定义显示属性。

(a) 在动画序列面板的显示类型下选择网格、等值线、矢量、XY 图或者监视器来确定动画显示的类型。如果你选择的是监视器你可以在监视类型下拉列表：残差、力、统计、曲面或者体积中选择任何可用的监视类型。

当你第一次选择等值线、矢量或者 XY 图时，或者在第一次选择监视器时你选择了某一监视器类型，FLUENT 会打开相应的面板（比如说：等值线面板或者矢量面板），这样你就可以修改设定并产生相应的显示。。要对任何显示类型的显示设定再做出修改，请点击属性按钮来打开选定的显示类型面板。

(b) 对于选定的显示类型（如：等值线或者解 XY 图）在面板中定义显示，然后点击显示或者绘图按钮。

注意：你必须点击显示或者绘图来初始化计算中被重复的场景。
关于网格、等值线和矢量的显示的定义，请参阅下面的指导原则。

7. 在你完成所有动画序列的定义之后别忘了在解动画面板中点击 OK 按钮。

注意，当你在动画序列面板中点击 OK 按钮确定某一序列时，该序列对应 **Active** 按钮会自动打开。你可以对当前不使用的序列关闭 Active 按钮，来选择使用所定义的动画序列的子集。

定义动画序列的方针

如果你定义的动画序列包含网格、等值线或者矢量显示，那么在定义显示时要注意下面几点：

- 如果要在动画帧中包含光照影响，请确保在开始计算之前定义光照。关于讲光照加入到显示中请参阅 25.2.6 节。
- 如果你想要在等值线或者矢量显示中保持颜色的常数范围，你可以在等值线或者矢量面板中关闭自动范围选项来明确指定范围。具体请参阅 25.1.2 或者 25.1.3。
- 在动画序列帧中不会包含场景操作，场景操作是在场景描述面板中指定的。诸如通过对称平面的景象等视角的修改会被包括进来。

22.17.2 播放一个动画序列

一旦你定义了一个动画序列并执行了计算，或者读入了先前的动画序列，你可以使用回放面板（下图）来回放动画。菜单：**Solve/Animate/Playback...** 。

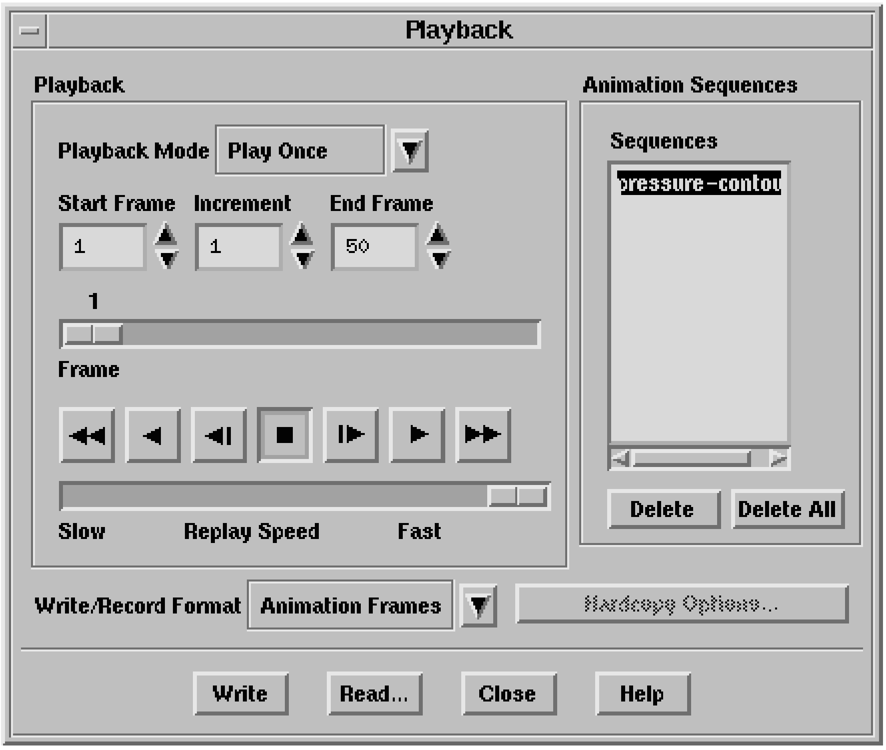


Figure 22.17.3:回放面板

在回放面板的动画序列下面的序列列表中选择你想要播放的序列。要播放一次从开始到结束的动画，请点击回放标题下面的播放按钮。（这种方式的按钮的功能和标准视频播放器的相似。右边数第二个三角形按钮是播放按钮）。要反向播放动画一次，请点击倒放按钮（左边数第二个三角形按钮）。当播放动画时，帧的标尺显示相对于整个动画的播放位置。如果你想跳到指定的帧处你可以直接移动帧滑标到所需要的帧处，这样相应的帧就会显示在图形窗口中。

对于光滑动画，请在显示选项面板中打开双缓冲。这将会减少播放时的闪烁。

下面将会介绍回放动画的附加选项。

修改视角

如果想在场景的不同视角播放动画，你可以在动画播放的窗口中使用鼠标来修改视角（如：平移、旋转、缩放）。需要注意的是，当你在序列列表中选择新的序列时（或者重新选择当前序列时），你对序列视角做的任何改变都会丢失。

修改回放速度

不同的计算机播放动画的速度都是不一样的，这主要取决于场景的复杂性以及图形相关硬件的类型。你可能想要放慢回放的速度来获得最优视角。你可以用回放速度滑标来调节播放速度。

摘选回放

有时候你可能只要播放很长动画序列的一部分。要实现这一功能你可以修改回放标题下面的起始帧和终点帧。例如，如果你的动画包括 50 个帧，但是你只想播放 20 到 35 之间的帧，你就可以设定起始帧为 20，终点帧为 35。这样，当你播放动画时，就会从 20 帧开始到 35 帧结束。

快进动画

你可以在回放中略过一些帧来快进或者快退动画。要快进动画，你可以设定增量然后点击快进按钮。例如，如果你有 15 个帧，起点是 1 帧，终点是 15 帧，增量是 2，那么动画就会只播放 1，3，5，7，9，11，13 和 15 帧。点击快退按钮就会播放相应的 15，13，11，9，7，5，3，1。

连续的动画

如果你想要重复连续的回放动画，有两个选项可供选择。要从起点到终点（或者从终点到起点）连续回放动画，请在回放模式下拉菜单中选择自动重复选项。要在播放中前后连续播放动画，每次调转播放方向，请在回放模式下拉列表中选择自动反向。

要关掉连续性回放，请在回放模式中选择播放一次。这是默认的设定。

停止动画

要在回放中停止动画，请点击停止按钮（回放控制按钮中间的方块）。如果你的动画中包含非常复杂的场景，那么在动画停止之前可能会有轻微的滞后。

一个帧一个帧的播放动画

要手动一个帧一个帧的播放动画，请使用右边数第三个按钮（一竖线加一个三角形）。每点击一次这个按钮就会在图形窗口中显示下一个帧。反向的按帧播放方法同上，只不过要使用左起的第三个按钮。这一功能可以是你看清楚每一个感兴趣的帧。

删除动画序列

如果想要移除应经读入或者创建的序列，请在序列列表中选择然后点击删除按钮。要全部删除电机全部删除按钮即可。

注意：如果你删除了未保存到磁盘的动画（即存储类型是内存的动画）这些动画就被永久的移除了。如果你要保存只存储在内存中的动画，你应该在删除或者退出 FLUENT 之前确信已经保存到磁盘了。

22.17.3 保存动画序列

创建了动画序列之后，你可以保存成下面任何一种格式：

- 包含在 FLUENT 图元文件中的解动画文件。
- 硬拷贝文件，每个文件都包含了动画序列的帧。

- 包含动画序列帧的 MPEG 文件。

注意：如果保存的是硬拷贝文件或者 MPEG 文件，你可以修改动画显示的图形窗口的视角（平移、旋转、缩放），然后保存修改后的视角而不是初始的视角。

解动画文件

如果存储类型选择的的是磁盘，FLUENT 会为你自动保存解动画文件。它会被保存在指定的存储目录中，文件名就是你所指定的序列名，扩展名是.cxa（如：pressure-contour.cxa）。除了.cxa 文件之外，FLUENT 还会为每一个帧保存图元文件，扩展名是.hmf（如：pressure-contour_2.hmf）。其中，.cxa 文件会包含相关的.hmf 文件的列表，并告诉 FLUENT 它们显示的顺序。

如果保存的类型是内存，那么相应的解动画文件(.cxa)以及相关的图元文件(.hmf)会在退出 FLUENT 之后丢失，除非你用下面的方法把它们保存起来。

当你想要重放动画时，你可以将动画序列保存成 FLUENT 可以重新读入的文件。如 22.17.4 节所述，FLUENT 回放的解动画文件是和生成这个动画文件的算例和数据文件无关的。

要保存解动画文件和相关的图元文件，请在回放面板中的写/记录格式下拉列表中选择动画帧选项并点击写按钮。FLUENT 会保存一个.cxa 文件和动画序列每一个帧的.hmf 文件。相应的.cxa 文件名就是指定的序列名（如：pressure-contour.cxa），图元文件名则是指定的序列名后面加上帧数（如：pressure-contour_2.hmf）。所有的文件（.cxa 和.hmf)都会被保存在当前工作目录中。

硬拷贝文件

你可以为动画序列中的每一个帧生成一个硬拷贝文件。这一功能允许你将序列帧保存为使用外部动画程序如 ImageMgick 可以使用的文件。如上所述，你可以在保存硬拷贝文件之前，修改图形窗口的视角。

要将动画保存为一系列的硬拷贝文件，请遵循如下步骤：

1. 在回放面板中的写/记录格式下拉列表中选择硬拷贝格式选项。
2. 必要的话，点击硬拷贝选项按钮打开图形硬拷贝面板，并为保存硬拷贝文件设定适当的参数（例如，如果你要保存 ImageMagick 使用的硬拷贝文件，你就应该选择窗口倾倒格式。具体可以参阅 3.12.1 一节）。在图形硬拷贝面板中点击应用来保存你修改后的设定。

   注意：不要在图形硬拷贝面板中点击保存按钮。在下一步中你将从回放面板保存硬拷贝文件。
3. 在回放面板中点击写按钮，FLUENT 会回放动画，将每一个帧保存到独立的文件中。文件名由指定的序列名加上帧的数目组成（如：pressure-contour_2.ps），而且它们会被保存到当前的工作目录中。

MPEG 文件

也可能将动画序列所有的帧保存到一个 MPEG 文件中，这种文件可以用 MPEG 解码器如 **mpeg_play** 来观看。将整个动画序列保存到一个 MPEG 文件需要的磁盘空间比存储每一个窗口倾倒文件（用硬拷贝方法）少，但是 MPEG 文件的图像质量较差。如前所述，在保存 MPEG 文件之前我们可以修改图形窗口的视角。

要将动画保存为 MPEG 文件，请遵循如下步骤：

1. 在回放面板中的写/记录格式下拉列表中选择 **MPEG**。
2. 点击写入按钮

FLUENT 会重新播放动画并将每一个帧保存在独立的 scratch 文件，然后会将这些所有的文件合并保存到单独的 MPEG 文件中。MPEG 文件的名字就是指定的序列的名字，扩展名为.mpg（比如：pressure-contour.mpg），而且它会被保存在当前的工作目录中。

22.17.4 读入动画序列

如果你已经将动画序列保存为一个解动画文件，你可以以后（或者在不同的线程中）将这个文件读入并播放动画。注意：你可以将解动画文件读入到任何 FLUENT 进程中，而不必将相应的算例和数据文件也读入。事实上，在将解动画读入到 FLUENT 之前，比根本就不必读入任何算例和数据文件。

要读入解动画文件，请在回放面板中点击读入按钮。此时会打开选择文件对话框，你可以在这里指定需要读入的文件名。

在计算过程中执行命令

如前面几节所述，在计算进程中你可以报告或监视各种量（例如：残差，力系数）。在计算过程中的指定间隔内，FLUENT 还允许你执行自己定义的命令。例如，你可以要求求解器在每个时间步之后绘制静温的等值线或者动压的等值线。你也可以要求求解器保存每一个迭代结果绘图的硬拷贝。你需要使用一系列的文本命令或者使用 GUI 来定义需要执行的步骤。

注意：如果要在计算期间的指定间隔内保存算例或者数据文件的，你必须使用自动保存 Case/Data 面板(菜单：File/Write/Autosave...)。具体请参阅算例和数据文件的自动保存一节。

指定需要执行的命令

你需要使用监视器命令面板（如下图）来标明要求求解器在指定的间隔处执行的命令。菜单：Solve/Monitors/Command...。

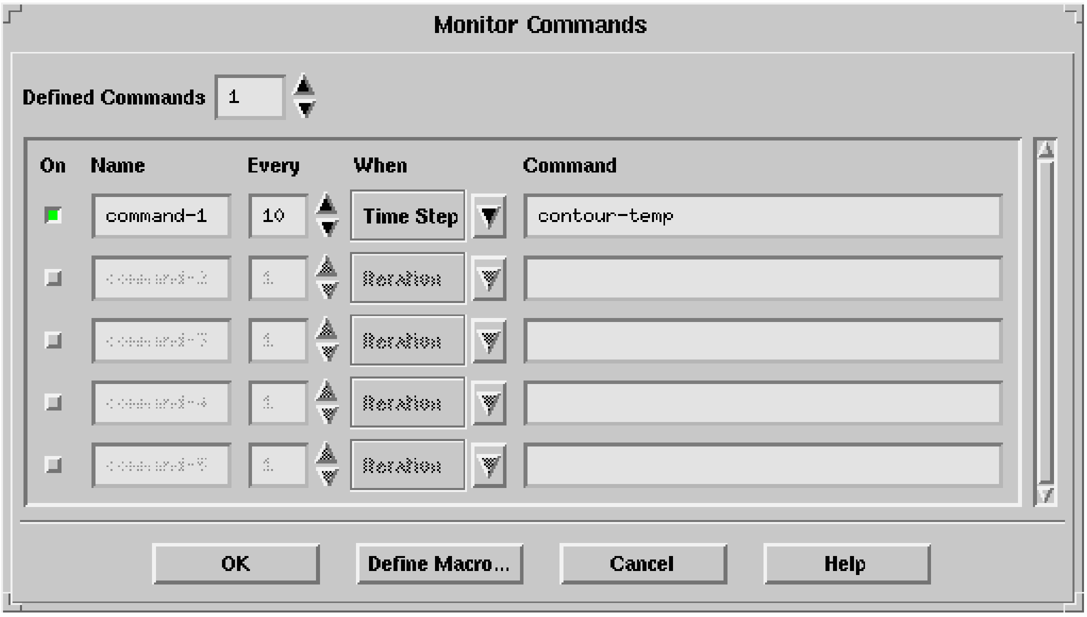


Figure 1: 监视命令面板

注意：如果要在计算期间的指定间隔内保存算例或者数据文件的，你必须使用自动保存 Case/Data 面板(菜单：File/Write/Autosave...)。

程序如下：

1. 增加定义命令的数值到你希望的指定的值。当这个数值增加时，附加的命令输入就变成可编辑的了。对于每一个命令你都需要执行下面的步骤。
2. 如果你想要在计算中执行命令，打开 On 按钮，然后键入命令。你可以定义很多命令，但是直执行其中的一部分命令，不需要执行的关掉就是。
3. 在名字标题下输入命令的名字。
4. 在 Every 下设定间隔或者在 When 下设定时间步来确定你想要命令执行的频率。其中时间步选项只对非定常流有效。例如：要每 10 次迭代执行命令，你需要在 Every 下输入 10、在 When 下选择迭代。

注意：如果你指定了迭代的间隔，一定要确保迭代面板中的报告间隔是默认值 1。

5. 在命令框中输入一系列的文本命令或者输入你已经（或将要）定义的一个命令宏的名字来定义命令。

注意：如果将要执行的命令包括保存文件的操作，请参阅在计算中保存文件一节弄清楚到底该如何进行正确的操作。

定义宏

命令监视器中自动执行的你所定义的宏，也可以在问题设定或者后处理过程中交互使用宏。比方说，你定义了一个在特定曲面上显示压力等值线的的宏来在每次迭代之后绘图，你也可以用这个宏在后处理时交互显示等值线

宏的定义如下：

1. 在宏命令面板中点击定义宏按钮来打开定义宏面板（下图）。因为这是一个模式面板，求解器只会在你完成第二步之后才允许你进行其它操作。如下：

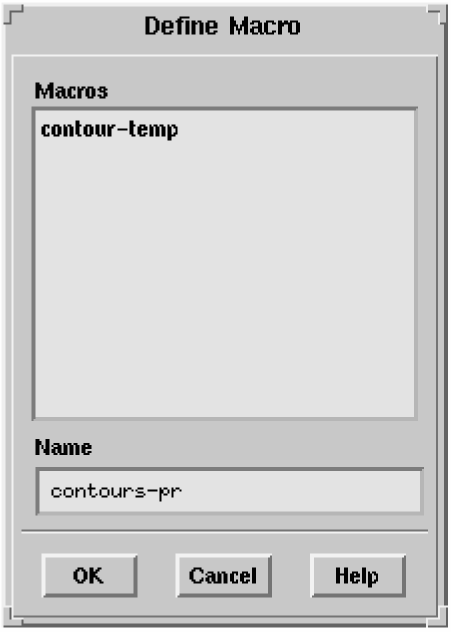


Figure 1: 定义宏面板

2. 在定义宏面板中指定宏的名字（如：contours-pr）然后点击 OK。（监视器命令面板中的定义宏按钮会变成停止宏按钮。）
3. 完成你需要宏完成的步骤。例如，如果你要求宏绘制压力等值线，打开等值线面板，选择适当的曲面和变量，然后点击显示绘制等值线。

注意：如果将要执行的命令包括保存文件的操作，请参阅在计算中保存文件一节弄清楚到底该如何进行正确的操作。

4. 当你完成了你需要宏执行的步骤，你就可以点击监视器命令面板中的停止宏按钮。

如前所述，一旦你定义了命令监视器可以使用的宏，你就可以在任何时候使用它。如果你定义了一个绘制压力等值线的名字是 contours-pr 的宏，你可以在控制台（文本）窗口简单的键入 contours-pr 来绘制等值线。这个宏和任何文本菜单是无关的，所以你不必进入到不同的文本菜单来使用它。宏可以保存成文件也可以从文件中读出来。要将当前定义的所有宏保存起来，请使用 file/write-macros 文本命令来完成。要读入宏文件，请使用 file/read-macros 文本命令。

注意：像日至文件一样，宏只是一个简单的记录/回放功能。因此它并不知道所记录的状态或者正在回放的状态到底是什么。在你或者用命令监视器激活宏之前你必须确保红所使用的所有的曲面、变量等已经被适当的定义。

在计算中保存文件

如果在计算中执行的命令包含了保存文件的操作，当你在选择文件对话框中输入文件名时必须包括特殊的字符，这样求解器就会知道将新名字分配到每一个文件。你可以用迭代数或者时间步来为文件计数。（这些为文件计数的字符串在你使用动画保存窗口倾倒时也很有用，具体可以参阅窗口倾倒（只用于 UNIX 系统）一节）。关于文件名的这些特定字符串的详细介绍请参阅文件的自动计数一节。

注意：如果你要在计算中的指定间隔处保存算例和数据文件，你必须使用自动保存算例/数据文件面板，对应的菜单：File/Write/Autosave...。详细内容请参阅数据文件和算例文件

的自动保存一节。

收敛性和稳定性

收敛性可能会受到很多因素影响。大量的计算单元，过于保守的亚松驰因子和复杂的流动物理性质常常是主要的原因。有时候很难确定你是否得到了收敛阶。在下面几节中，将会介绍提高收敛性并保证稳定性的数值控制和建模技巧。

在阅读这一节之前你应该首先了解选择离散格式和选择压力速度耦合方法中介绍的离散格式的选取以及分离求解器中压力速度耦合格式对于收敛性的影响。在设定亚松驰因子和修改代数多重网格参数中我们还会介绍亚松驰参数和多重网格的设定来提高收敛性。

判断收敛

没有判断收敛性的普遍准则。残差定义对于一类问题是有用的，但是有时候对其它类型问题会造成误导。因此，最好的方法就是不仅用残差来判断收敛性而且还要监视诸如阻力、热传导系数等相关的积分量。

对于大多数问题，FLUENT 默认的收敛判据已经足够了。这个判据需要标度的残差，标度的残差分别在分离求解器残差定义中的方程 7 和耦合求解器残差定义的方程 3 中定义。除了能量方程和 P-1 方程的标度残差判据为 10^-6，其它所有方程都是 10^-3。

但是有些时候这个判据是不合适的。下面列出了几种典型的情况。

- 如果你对流场的初始猜测很好，初始的连续性残差会很小从而导致连续性方程的标度残差很大。在这种情况下，检查未标度的残差并与适当的标度如入口的质量流速相比较是很有用的。
- 对于某些方程，如湍流量，较差的初始猜测可能会造成较高的标度因子。在这种情况下，标度的残差最开始会很小，随后会呈非线性增长，最后减小。因此，最好是从残差变化的行为来判断收敛性而不仅仅是残差的本身值来判断收敛性。你应该确认在几步迭代（比如说 50 步）之后残差继续减小或者仍然保持较低值，才能得出收敛的结论。

另一个判断收敛性的流行方法就是要求未标度的残差减小到三阶量级。为了实现这一方法，FLUENT 提供了残差标准化，有关残差标准化的信息请参阅分离求解器残差定义和耦合求解器残差定义两节。在这种方法中，要求标准化的未标度残差降到 10^-3。但是这种要求在很多情况下可能是不合适的。

- 如果你提供了较好的初始猜测，残差可能不会降到三阶量级。比方说，在等温流动中，如果温度的初始猜测非常接近最终值，那么能量残差根本就不会降到三阶量级。
- 如果控制方程中包括的非线性源项在计算开始时是零，但是在计算过程中缓慢增加，残差是不会降到三阶量级的。例如，在封闭区域内部的自然对流问题，由于初始的均一温度猜测不会产生浮力，所以初始的动量残差可能非常接近零。在这种情况下，初始的接近零的残差就不适合作为残差的较好的标度。
- 如果所感兴趣的变量在所有的地方都接近零，残差不会降到三阶量级。例如，在完全发展的管流中，截面上的速度为零。如果这些速度初始化为零，那么初始的和最终的残差都接近零，因此也就不能期待降三阶量级。

在这种情况下，最好监视诸如阻力、总热传导系数等积分量来判断解的收敛。检查非标准化未标度的残差来确定这个残差和适当的标度相比是不是很小也是很有用的。我们可以考虑选择分离求解器残差定义中的方程 7 或者耦合求解器残差定义中的方程 3（默认）中定义的残差。

相反，如果初始猜测很差，初始的残差过大以至于残差下降三阶量级也不能保证收敛。这种情况对于初始猜测很难的 k 和 e 方程尤其常见。在这里，检查你所感兴趣的所有积分量就很有用了。如果解是不收敛的，你可以减少收敛公差，具体请参阅修改收敛性判据一节。

一步一步的解决问题

对于复杂问题加速收敛的一个技巧就是一次处理一步问题。当模拟热传导问题时，你可以从等温流动开始计算。要解湍流问题，你可以从层流流动开始计算。模拟反应流动时，你可以先计算非反应流动的部分收敛解，也可能包括组分混合。模拟离散相时，如从液滴的燃料蒸发，你可以先解气相流场。这样的解一般对复杂问题来说为计算提供了一个很好的起点。这样的解对于更为复杂问题来说提供了较好的起点。这些一步接一步的解算技巧包括了使用解控制面板来打开关闭某些方程的操作。

选择解方程的子集

FLUENT 自动解算面板模型族中打开的每一个方程。如果你在粘性模型面板中指定流动为湍流，那么湍流量的守恒方程就会打开。如果你在能量面板中指定 FLUENT 应该激活能量，那么能量方程就会被激活。将计算集中在最重要的方程上就会加速收敛。在解控制面板中的方程列表允许你临时打开和关闭个别的方程。菜单：Solve/Controls/Solution...。

计算热传导就是一个典型的例子。最开始你需要定义完整的问题，包括热边界条件和温度相关流动属性。随着问题的设定，你就需要使用解控制面板来临时关闭能量方程。然后你就可以计算等温流场，要记住为流体的温度设定合理的初始值。

注意：这可能只是对分离求解器来说的，耦合求解器是以耦合的方法将能量方程和流动方程一起解出，所以你无法使用上面的方法将能量方程关闭。

当等温流动合理的收敛，你可以重新打开能量方程。事实上，在计算能量场时你可以关闭动量和连续性方程。当能量场开始收敛的很好时，你就可以重新打开动量和连续性方程，从而流动模式可以调节到新的温度场。这样，由于温度对流体属性（如：密度、粘性）的影响，温度就又重新耦合导流动解中了。如果流体的属性不随温度变化，温度场就不会对流场有影响了。在这种情况下，你可以不必再打开流动方程而直接计算能量场。

注意：如果你已经指定了温度相关流动属性，那么在关闭能量方程的计算之前你应该确信通过整个流场的温度的已经比较现实的设定。如果使用的是不切合实际的温度场，那么于温度相关的流动属性也会不真实，流场就会受到负面影响。关于温度场的初始化和在已有的解的基础上修补温度等内容请参阅解的初始化一节。

打开和关闭反应项

要在解反应流动之前解决组分混合问题，在设定问题时，你应该设定所有包括反应的信息并保存成完整的算例文件。你可以使用组分模型面板关闭体积反应选项来解决只有组分混合而没有反应的问题。菜单：Define/Models/Species...。

一旦组分混合问题部分收敛，你就可以回到组分模型面板重新打开体积反应选项。现在你就可以从已经部分收敛的数据开始计算了。

对于燃烧问题，在重新开始计算之前你可能需要在参加反应的附近修补一下高温。关于流动变量初始值的修补请参阅在选定单元内修补数值一节。

修改代数多重网格参数

对于大多数问题来说，默认的代数多重网格设定已经足够了，但是有极小一部分问题需要对其作较小的修改。本节就是介绍如何分析多重网格求解器的行为来确定需要修改哪些参数。对于几个特定的问题还提供了推荐设定并解释如何设定多重网格参数。

分析代数多重网格求解器

如前所述，在大多数情况下，你不需要对多重网格求解器给予太多的注意。但是，如果你有收敛性的困难，或者你希望使用更为精确的设定来减少整个解算的时间，你就可以监视多重网格求解器并修改参数来提高性能。（下面所介绍的都是假定你已经开始计算，如果不存在上面提到的两种情况，你就不需要监视求解器。）

要确定修改多重网格设定是否有利于解决收敛性困难，你可以检查在每一个网格层面所要求的残差是否减小了。要最小化解算的时间，你就需要检查是否转到更强大的循环会减少整个工作量

监视代数多重网格求解器

监视求解器的步骤如下：

1. 在多重网格控制面板设定多重网格 Verbosity 为 1 或者 2。菜单：Solve/Controls/Multigrid。
2. 用迭代面板请求一步迭代。菜单：Solve/Iterate...。

如果你设定 verbosity 为 2，在控制台窗口为每一个方程打印出的信息都包括：

- 方程名字
- 方程公差（求解器用源矢量的标准化计算出来的）。
- 每一个固定的多重网格循环或者灵活循环的精细松弛之后的残差值。
- 每一个多重网格层面中方程的数目，零层原始的（最精细层面的）方程系统。

注意在循环或者松弛 0 处打印的残差是任何多重网格循环执行之前的初始残差。

如果 verbosity 被设为 1，只打印方程名字、公差和残差。

下面是一个打印出来的例子的一部分：

```
pressure correction equation:
 tol.   1.2668e-05
     0   2.5336e+00
     1   4.9778e-01
     2   2.5863e-01
     3   1.9387e-01
  multigrid levels:
      0      918
      1      426
      2      205
      3       97
      4       45
      5       21
      6       10
      7        4
```

在默认的情况下，除了压力校正方程使用 V 循环之外，所有方程都使用灵活循环。最典型地，在最精细的层面灵活循环只有很少的（5-10）松弛，而且没有粗糙层面会被用到。

在有些情况下，可能会有一到两个粗糙层面会被用到。如果精细层面松弛的最大数不够，你可能需要增加最大数（具体参阅改变松弛的最大数一节）或者转到 V 循环（参阅指定多重网格循环一节）。

对于压力校正来说，默认使用 V 循环。如果最大的循环数不够（默认是 30），你可以使用多重网格控制面板来转到 W 循环（具体请参阅指定多重网格循环类型一节）。注意：对于并行求解器，W 循环可能会降低效率。如果你使用并行求解器，你可以在多重网格控制面板的固定循环参数下面增加最大循环的数值来增加最大循环数。菜单：Solve/Controls/Multigrid...。

改变松弛的最大循环数

要改变松弛的最大数，请在多重网格控制面板（下图）的灵活循环参数下增加或者减少最大精细松弛或者最大粗糙松弛的数值。菜单：Solve/Controls/Multigrid...。

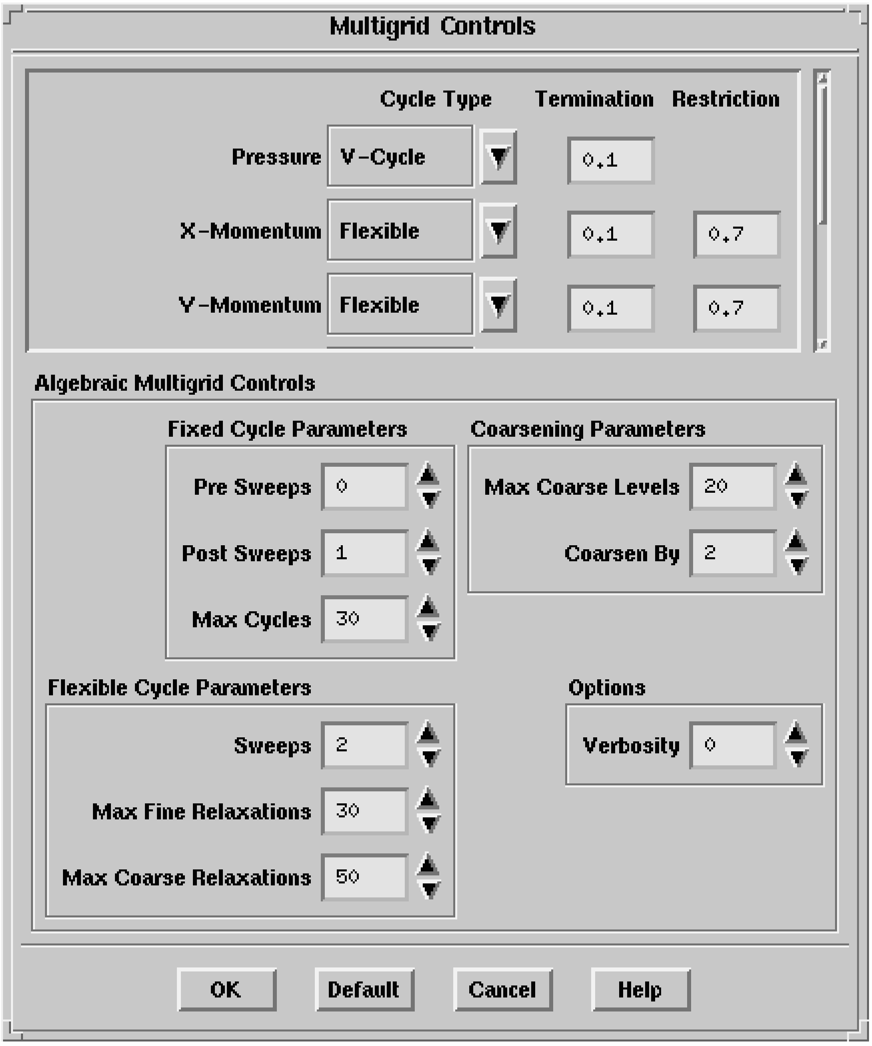


Figure 1: 多重网格控制面板

指定多重网格循环类型

在默认的情况下，除了压力校正方程使用 V 循环之外，所有方程都使用灵活循环。要

改变某一方程的循环类型，你就可以用多重网格控制面板（上图）上面的部分来设定。

对于每一个方程你都可以在下拉列表中选 V 循环、W 循环或者 F 循环。

设定终止和残差减少参数

当你对一个方程使用灵活循环时，你可以通过在多重网格控制面板的顶部修改该方程的终止和/或限制判据来控制多重网格的的行为（改变松弛的最大数一节中的图 1）。菜单：Solve/Controls/Multigrid...。

限制判据就是灵活循环一节中的方程 1 的残差减少公差 b。这个参数规定了什么时候必须使用粗糙网格层面（由于当前层面解的改善不明显）。对应的 b 值越大，粗糙层面进行的运算就越少（反之亦然）。灵活循环一节中的方程 3 就是终止判据，它控制了什么时候求解器应该返回到较精细的网格层面（即：在当前层面什么时候残差已经充分的改善了）。

对于 V，W 或者 F 循环，终止判据确定了是否应该在最精细的（初始的）网格层面执行另一个循环。如果最精细的层面上当前的残差不满足灵活循环一节中的方程 3，而且还没有执行到最大的循环数，FLUENT 将会执行另一个多重网格循环（V，W 和 F 循环不使用限制参数）。

附加的代数网格参数

有几种附加的参数可以控制代数多重网格求解器，但是通常不需要修改它们。这些附加的参数都包含在多重网格控制面板中（改变松弛的最大数一节中的图 1）。菜单：Solve/Controls/Multigrid...。

对于所有的多重网格循环类型，你可以控制粗糙层面的最大数（粗糙参数的下面的最大粗糙层），它会被多重网格求解器构建出来。直到层面的最大数被创建或者罪粗糙的层面只有 3 个方程了，较粗糙的联立方程组才停止构建。每一个层面大约具有前一层面的一半未知量，所以粗糙过程要一直进行到只剩几个较少的单元，这个粗糙过程需要和精细网格所需要的一样多的总粗糙层面系数存储。减少粗糙层面就会减少所需要的内存，但是就需要更多的迭代才能得到收敛解。如果将最大粗糙层面设为 0 就关闭了代数多重网格求解器。

你可以控制的另一个粗化参数就是在连续的层面上粗糙度的增加。“用……粗糙”的参数指定了组到一起创建一个粗糙网格单元的精细网格的单元数。这个算法将每一个单元与最邻近的单元分组，然后将它们组到一起，这样直至实现所需要的粗糙度。最典型的值在 2 到 10 之间，默认值是 2，对应的性能最好但是也需要最多的内存。除非你需要减少处理问题所需要的内存，否则你不应该调节这个参数。

对于固定的（V，W 和 F）多重网格循环，你可以控制预松弛和后松弛数，其中分别对应 V 和 W 循环和 F 循环两节中的 b_1 和 b_2。预扫掠设定了移动到粗糙层面之前需要执行的松弛数。后扫掠设定了应用粗糙层面校正之后需要执行的松弛数。一般说来只有一个后松弛而没有预松弛。

返回默认的多重网格参数

如果你已经改变了多重网格参数，但是现在你想要回到 FLUENT 的默认设定，你可以在多重网格控制面板中点击默认按钮。FLUENT 就会将所有设定改回到默认值，此时默认按钮就会变成重置按钮。要将你的设定改回来，你就可以点击重置按钮。

设定 FAS 多重网格参数

对于大多数计算，一旦你已经设定了大量的粗糙网格层面，就不需要修改任何 FAS 多重网格参数了。但是，如果你遇到了收敛性困难，你可以考虑下面所建议的程序。注意：一定要记住 FAS 多重网格只用于耦合显式求解器。

解决收敛性困难

有些问题在开始是很容易的收敛，但是后来残差就变得稳定了因此解也就是不真实的。在有些情况下（如长细管道），出现这种收敛性困难往往是由于多重网格减缓了压力信息在整个流场中的传播造成的。在这种情况下，你应该在解控制面板中的解参数下设定多重网格层面为零从而关闭多重网格。菜单：Solve/Controls/Solution...。

"Industrial-Strength" FAS 多重网格

在有些情况下，你会发现你的问题是收敛的但是速度极慢。如果使用多重网格传播更快的格式就会加速解校正的传播，从而能够有益于这种问题的解决。对于这类问题你可以尝试使用"industrial-strength"多重网格设置。

注意：这些设定使得解的校正传播相当快，它假定传过多重网格的解信息在某种程度上是准确的。因此，你必须在执行了足够多的迭代步之后才可以尝试这里所介绍的程序。如果使用"industrial-strength"多重网格过早，也就是说解还远远不够正确，它是不会加速收敛的而且可会造成计算的不稳定，因为每一个不正确的值都在初始网格中迅速的传播开来。还需要注意的是，这些多重网格设定会减少得到收敛解所需要的迭代步，但是对于每个多重网格循环来说是要花费大得多的时间。因此求解器会执行较少的迭代步，但每一个迭代步需要的时间更长一些。

所使用的策略如下：

- 在处理下一个更粗糙的层面之前，增加每一个网格层面的迭代数。
- 在从较粗糙的网格层面返回之前，增加每一个网格层面的迭代数。
- 从一个层面到下一个更精细的层面允许完全的校正转移，而不是转移校正的减少值。
- 从较粗糙的网格将插值校正转移到较精细网格时，不对插值校正进行光滑。

你可以在多重网格控制面板的FAS多重网格控制框中设定这一策略所需要的所有参数，然后继续计算。菜单：Solve/Controls/Multigrid...。

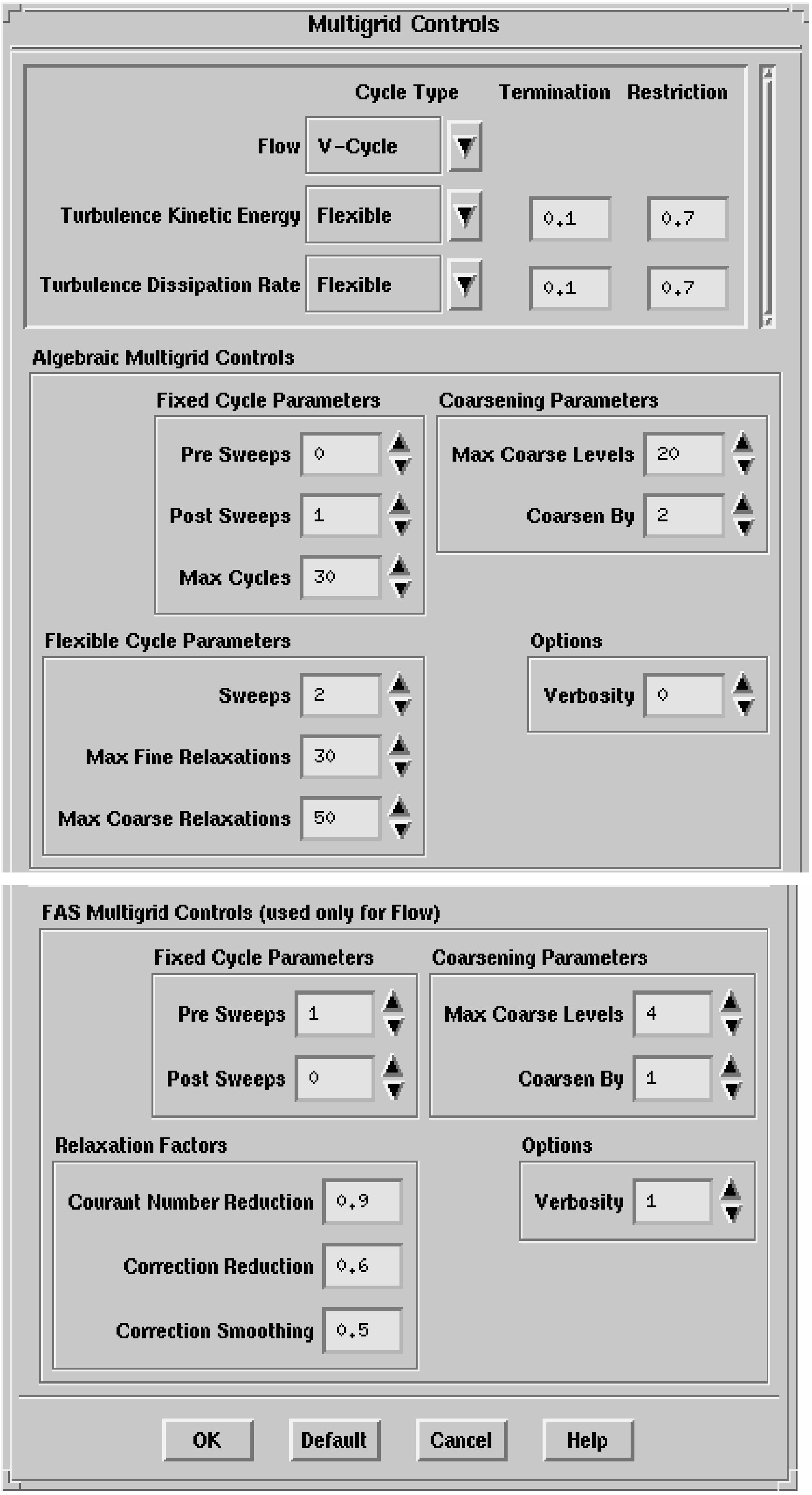


Figure 1: 多重网格控制面板

在进行下一个粗糙网格（V 和 W 循环与 F 循环两节中所描述的 b_1）处理之前增加每一个网格层面的迭代数可以改善从较精细网格层面到下一个较粗糙网格层面的解。尝试将预扫掠的值增加到 10（是在 FAS 多重网格控制中而不是在代数多重网格控制中。

在从较粗糙网格层面返回之前增加每一个层面上的迭代数会改善从每一个较粗糙网格

层到下一个较精细网格层的校正传递。因此，可以减小在较粗糙网格上引入的误差从上层网格传到初始网格的传递。尝试将预扫掠的值增加到 10（是在 FAS 多重网格控制中而不是在代数多重网格控制中）。

在默认的情况下，多重网格的校正值并没有从较粗糙网格全部传到较精细网格：只有60%的值被传输了。这就阻止了较大的误差过快的传到初始网格而导致解变得不稳定。当然，它也会使得较好的解无法快速的传到初始网格。增加校正减少到 1 就可以将全部的值从较粗糙网格传到较精细网格层面了，从而加速了解的传播，通常也就加速了收敛。

当校正从粗糙网格传到较精细网格层时，在默认的情况下，是先进行插值然后进行光滑处理。取消光滑处理就可以使粗糙网格单元的真实值分配到精细网格，这样也可以有助于收敛。要关闭光滑处理，请设定校正光滑为 0。附加的后扫掠处理会对单元之间的不连续性进行光滑。

附加的多重网格参数

有几种附加的参数可以控制多重网格求解器，但是通常不需要修改它们。这些附加的参数都包含在多重网格控制面板中。菜单：Solve/Controls/Multigrid...。

在默认的情况下，V 循环用于流动方程中（具体请参阅多重网格循环一节关于各种可用循环的描述）。要改换到 W 循环，你可以在多重网格控制面板的顶部的流动后面的下拉列表中选中它（"Industrial-Strength" FAS 多重网格中的图 1）。

在多重网格控制面板的底部的 Courant 数减少下设定粗糙网格层面（即：除了最精细层面）减少的 Courant 数因子。通常是需要时间步的一些减少的（如：默认是 0.9），这是因为在不规则外形的较粗糙网格单元上无法精确确定稳定性极限。

修改多步时间步进参数

改变对多重时间步进格式控制的最常用参数就是 Courant 数。关于修改 Courant 数的说明在改变 Courant 数一节介绍，本节主要介绍其它不太常改变的参数的修改程序。

使用残差光滑来增加 **Courant** 数

隐式残差光滑（或者平均）可用于减少求解器的时间步限制，因此允许 Courant 数增加。隐式光滑是用迭代 Jacobi 方法来实现的，具体请参阅显式格式一节。你可以在解控制面板中控制残差光滑。菜单：Solve/Controls/Solution...。

在默认的情况下，残差光滑的迭代数为零，也就是说不进行残差光滑。如果你将迭代计数器增加到 1 或者更多，你可以输入光滑因子。光滑因子为 0.5，且两次通过 Jacobi 光滑器通常就足以允许 Courant 数加倍了。

改变多步格式

也可能对多步时间步进格式本身作出一些改变。你可以改变步数，并为每一步设定新的多步系数。你也可以控制在每一步中是否更新耗散和粘性应力。这些改变都在多步参数面板（下图）中完成。菜单：Solve/Controls/Multi-Stage...。

注意：除非你对多步格式相当熟悉，而且有兴趣尝试一下文献中介绍的不同格式，否则你不应该对 FLUENT 的多步格式做任何改变。

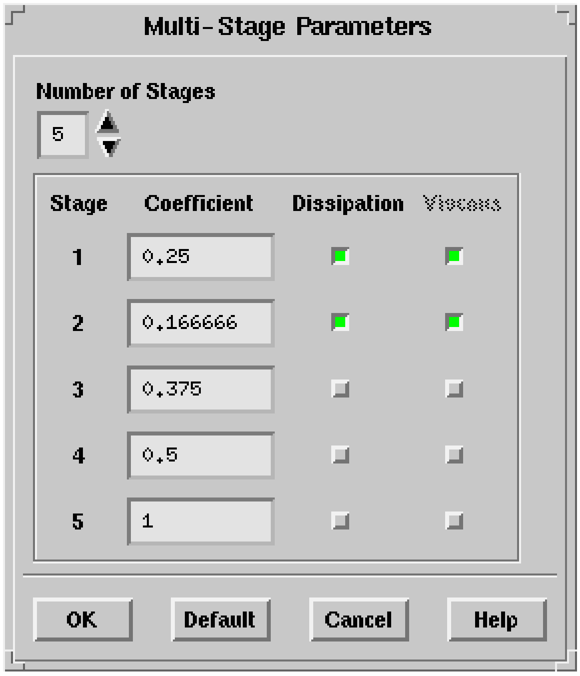


Figure 1: 多步参数面板

在默认的情况下，FLUENT 多步格式使用 5 步，对应的系数从第一步到第五步分别为 0.25，0.166666，0.375，0.5 和 1.0。你可以使用在多步参数面板中的步数下面的箭头按钮减少步数。（如果你想要增加步数，你就需要使用文本界面命令 solve/set/multi-stage。）对于每一步，你都可以修改系数，系数必须大于 0 小于 1。最后一步的系数应该总是 1。

对于每一步，你都可以表明是否对人工耗散和粘性应力进行估值。如果某一步对应的耗散按钮被选择了，那么在这一步就会更新人工耗散。如果没有选择，那么人工耗散仍然会保持为前一步的数值。如果某一步对应的粘性框被选择了，那么这一步就会更新粘性应力。如果没有选择，那么粘性应力仍然保持为前一步的数值。在第一步应该总是要计算粘性应力的，连续不断的估值会增加解过程的鲁棒性，但是也会增加计算花费（也就是增加了每一步迭代的 CPU 时间）。对于定常问题，最后的解是和粘性应力更新的步无关的。

如果你已经改变了多步参数，但是现在你想要回到 FLUENT 的默认格式，你可以在多步参数面板中点击默认按钮。FLUENT 就会将所有设定改回到默认值，此时默认按钮就会变成重置按钮。要将你的设定改回来，你就可以点击重置按钮。

第二十三章　网格自适应

fluent 中自适应网格完善特征允许我们根据数据计算结果来修改网格梳密布置或网格走向。另外，fluent 还提供了创建和查看特定应用的自适应方法。下面各部分详细描述了自适应的过程。

23.1，自适应的使用
23.2，自适应过程
23.3，边界自适应
23.4，倾斜度自适应
23.5，等值线的自适应
23.6，区域自适应
23.7，体积自适应
23.8，　y^+ 和 y^- 的自适应
23.9，管理自适应注册
23.10，自适应控制
23.11，用修匀和交换方法来改善网格

23.1 自适应的使用

在 fluent 中非结构化网格特征的两个重要优点是：

① 跟结构化网格相比减少创建时间

② 不会带来因插入新的网格点而使其他单元品质变坏

用自适应法完善网格，在网格中如果你需要可以增加网格单元，这样使你更精确地计算流场的特性。当你正确地用了网格自适应方法，那得到的网格对流体计算是最优的，因为这方法能确定哪里加入了有更多网格单元。换句话也就是说，充分地利用了计算的资源由于在结构化网格法中典型出现的不必要的网格单元。而且，在没有完整生成网格条件下，网格完善在计算上的效果就可以实现了。

23.1.1 网格自适应例子

一个很有用的如何网格自适应例子是用来计算通过一个二维涡轮可压缩湍流。图 23.1.1 描述了环绕叶片的很精细的初始网格。它表面的节点分布能给叶片几何足够的精度，并且不需要进一步地自适应就能正确地计算湍流边界层。在另外一面，在进口和出口的网格和周期性边界层是相对粗糙了。为了确保在叶片通道的流体能合适的计算，我们采用自适应法来完善网格。图 23.1.2 为自适应后的网格。

尽管这自适应法的过程可根据被计算的流体而变动，但在这里拿一个涡轮喷流的自适应网格的过程来作为一个例子来介绍自适应的过程。注意，尽管这个例子是针对可压缩流体的，但是这一般的步骤同样适用于不可压缩流体。

1、 显示等压线的自适应函数来决定一个适当的精度界限值。（参考 23.4 部分）

2、 确定什么样的网格是“优化”的网格，从而确定相应的误差指针。

3、 用马赫数作为精度标准，重复步骤 1 和 2，

为完善弱区域网格，可用等总压值作为标准。（参考 23.5 部分）　由于总压损失高的的区域就出现在边界层和弱区，所以这样就可对边界层和弱区域做好标记。

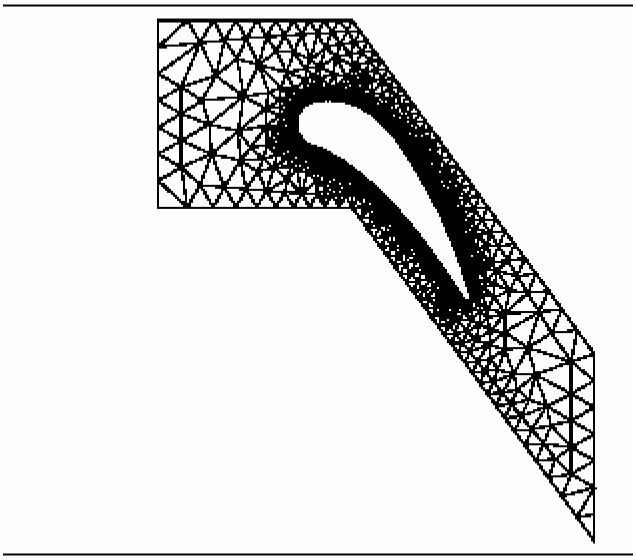


图 23.1.1 涡轮喷流自适应前的网格

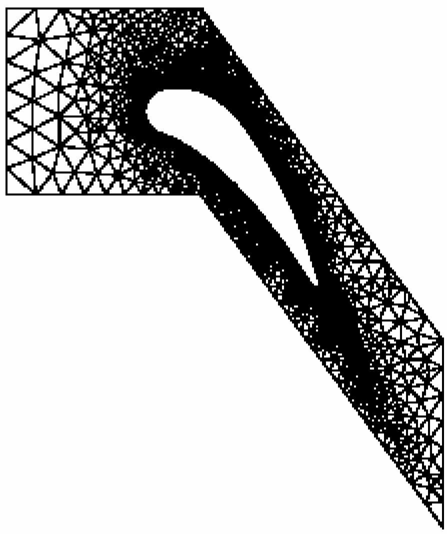


图 23.1.2   涡轮喷流自适应后的网格

4、 用自适应注册管理（Manage Adaption Registers）面板来合并三个网格改善注册为一个注册。（参考 23.9 部分）

5、 为防止已经调整到足够优的边界层网格的数量的增加，我们要限制最小网格单元体积。

6、 改善网格单元，包括自适应注册产生的网格。（参考 23.9 部分）

7、 在 Smooth/Swap Grid 面板上，执行连续的修匀和交换的迭代运算。

如图 23.1.2 所示，在叶片通道中和叶片主边的前端的网格看来，倾斜度上网格改善效果是明显的。通过用等总压值的自适应方法，使得弱区的网格更优。

23.1.2 自适应准则

在 23.1.1 部分的涡轮喷流例子中被恰当采用的自适应法完善网格优越性是很大，但是同时我们也要力图避免某些缺陷。下面列出了一些正确采用自适应完善网格的一些准则：

1、 表面网格必须足够的好来为表征一些重要的几何特征。例如，在明显弯曲的机翼表面，如果布置的节点数太少，这样计算效果就会不好。显然，表面总会包含一些含有初始网格的小面，尽管你通过网格的完善增加一些节点。
2、 初始网格应该有足够多的网格单元来捕获流场的关键特征。比如，假设你是想预测在超音速流中围绕一个扁平体的冲击流场的情况。除了有足够的表面计算来反映扁平体的形状特征，初始网格应该有足够多的为了能得到第一次合理的结果。随后的倾斜度自适应可以更好地反映着冲击流并且建立一个独立网格的结果。
3、 在进行网格自适应前应该是一个合理收敛的结果。如果你是对一个不正确的计算，那么自适应增加的网格就会加在错误的区域。但是你必须小心判断自适应前怎么样才是好的收敛的计算结果，因为这是一个在迭代未收敛前进行过早的网格自适应和迭代结果没什么变化时还继续迭代造成的时间浪费两者之间的权衡比较问题。
4、 在进行倾斜度自适应时，你必须选择恰当的变量。对于某些流体，这选择是很明确的。比如，对于在冲击流区域的网格完善时选择压力梯度是一个良好的标准。但是，对于大多数不可压缩流体，压力梯度就不重要了。对不可压缩流体的一个更合适的参数可能是平均速度梯度。如果流体重要特征是湍流剪切流，那么在解决湍动能梯度和湍能扩散问题它就显得重要了。因此这些就可以是恰当的完善网格变量。对于反应流，反应物质的温度和浓度（摩尔分量或这里分量）可以是完善网格的合适变量。
5、 差的自适应操作可能会产生不利的效果。其中最常见的一个错误就是在某个特定的计算区域进行过分完善，这样会造成网格单元体积的太大梯度。这对计算正确性会产生不利的影响。

23.2 网格自适应过程

网格自适应过程可以分为两个重要部分。首先，根据在几何和计算数据基础上建立的自适应函数来确定什么样的网格是优什么网格是劣。接着，对网格进行改造以达到“优化”网格的要求。这种调整网格方法的主要的优点是可以建立成熟的自适应函数并且可以在没有改变已存在网格的条件下来实现多种自适应函数。

！在进行自适应过程前，建议你先建立 case 文件和 data 文件。这样，如果你产生不理想的网格，你还可以用保存了的文件来重新开始这过程。

在 fluent 中有两种类型的自适应方法：“conformal”和“hanging node”自适应。默认的方法为 hanging node 方法，见 23.2.2 部分。在三角形和四面体网格时候可用 conformal 方法，见 23.2.3 部分。

23.2.1 网格自适应和选择寄存器（Adaption and Mask Registers）

调用 Mark 命令可以建立网格自适应寄存器。之所以称为寄存器是因为它跟在计算器中路径存储寄存器的方式一样。例如，一个自适应寄存器存有一个操作，另一个寄存器中存有第二次操作，并且这些寄存器可以产生第三个寄存器。一个自适应寄存器是基本上是在这领域中每个网格单元的标识符的列表。这些标识符表明一个网格单元是区域中间区域（就是没有标记的），太精细的标记或者是太粗糙的标记。这自适应函数就是用来设定正确的标记符。例如，为了在压力梯度基础上细化单元格，这求解器就会计算每个单元的倾斜度自适应函数。单元的计算值跟细和粗的域值进行对比，并分配合适的标记符，比如下面的例子：

网格单元值<粗域值：标记粗化

粗域值<网格单元值<细域值：不用标记，即中间

网格单元值>细域值：标记为细化

这 GUI 和文本界面命令产生自适应寄存器来指派网格单元的粗化或细化标记。这些寄存器可以被转化成选择寄存器。选择寄存器不象自适应寄存器，它主要分为两个选择状态：激活和不激活。当自适应寄存器转化为选择寄存器时，标记为细化的网格单元变成激活，而没标记或标记为粗化的网格就变成不激活。你可以用这选择寄存器来把一些网格的自适应限制在某个特定的区域。下面就介绍了这一过程。

图 23.2.1 显示了代表自适应寄存器的网格云图（阴影单元是标记了的网格单元）。图 23.2.2 说明了选择寄存器中的激活网格单元。如果在自适应寄存器中应用（或结合）mask，则形成了带标识符网格单元的新的自适应寄存器，如图 23.2.3 所示。(注意这个例子不是区分细化标识和粗化标识，因为这里 mask 是用于两种标识的)，关于联合寄存器的更多的信息可参考 23.9 部分）

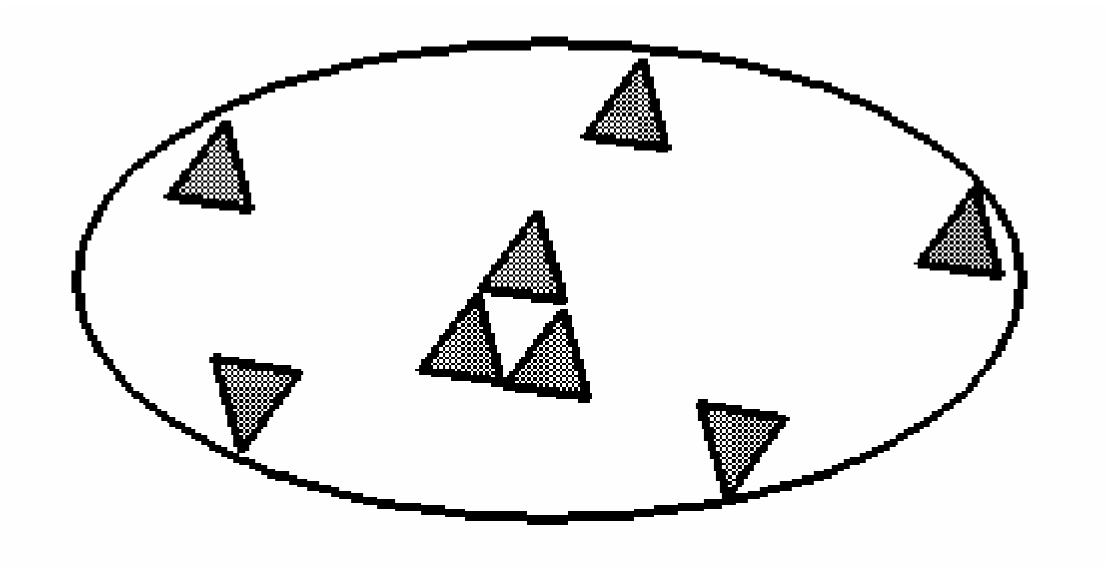


图 23.2.1　　带代表标识了的网格单元的阴影网格单元的自适应寄存器

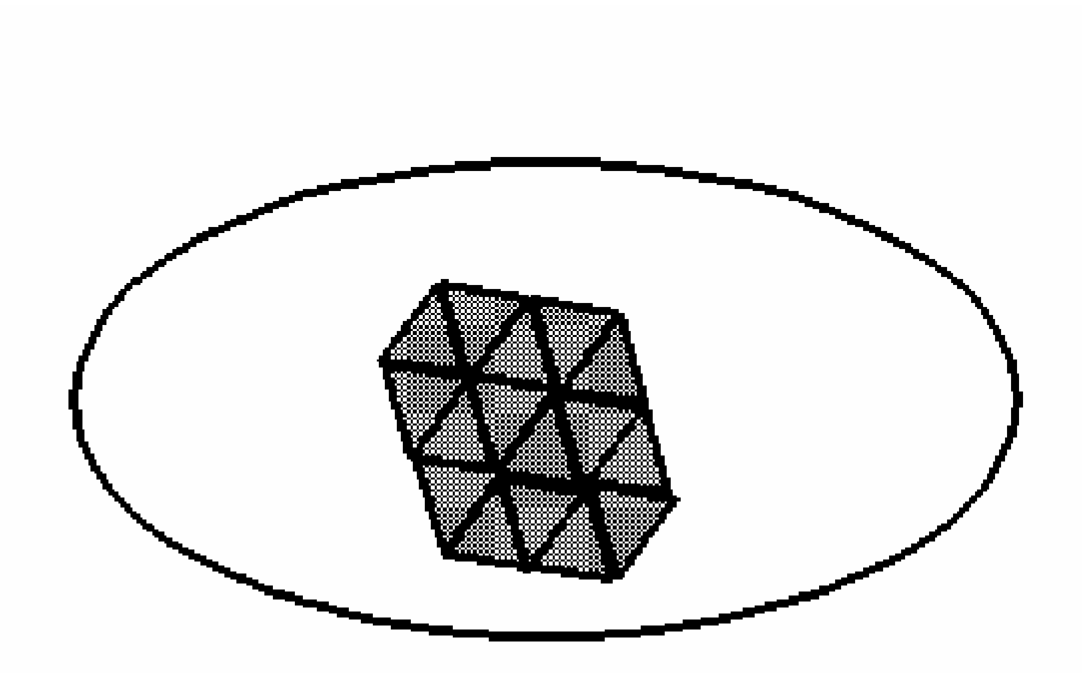


图 23.2.2　带代表激活单元的阴影网格单元的选择寄存器

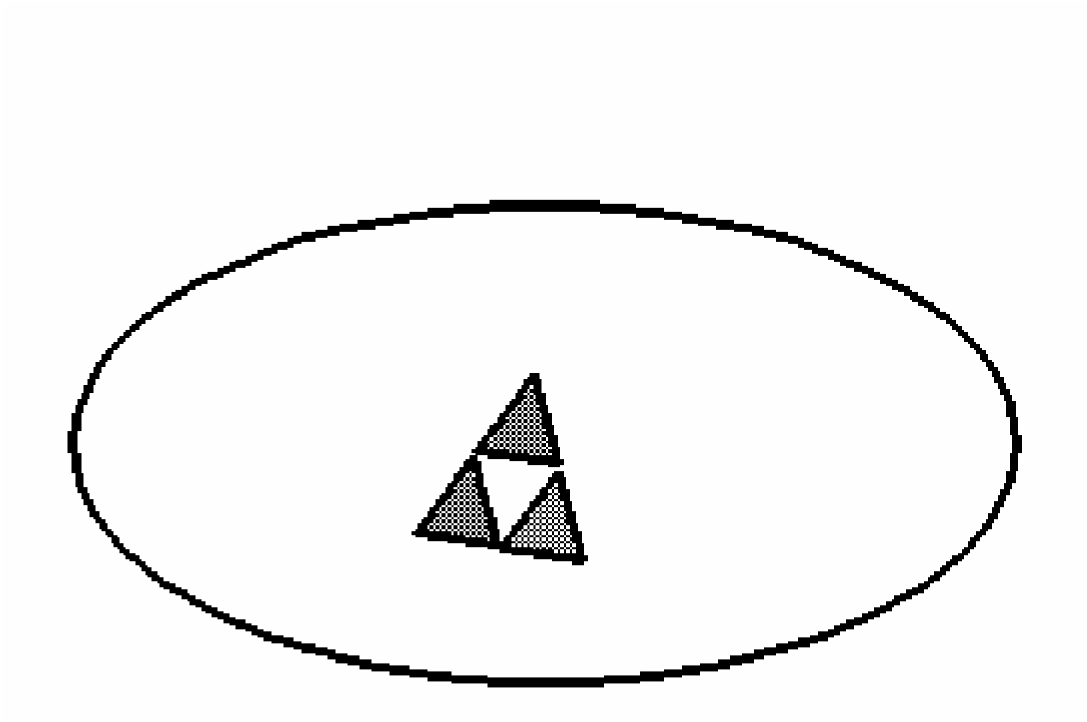


图 23.2.3　　从 mask 的应用建立的新的自适应寄存器

总之，用几何数据，流场的物理特性及这信息的综合来创建自适应寄存器。一旦建立了，自适应寄存器可以被列表，显示，删除，合并，交换，转变，及转化为选择寄存器。

23.2.2　Hanging Node 自适应

用 hanging node 自适应方法产生网格　hanging node 是指边和面上的但又不是所有网格共享的边或面上的点的节点，如图 23.2.4 所示。hanging node 网格自适应方法提供了在带许多不同单元形状的网格上用操作的能力。然而，尽管 hanging node 方法提供了重要的网格灵活性，但它确实要求额外的存储空间来维持网格自适应操作需要的网格分层。

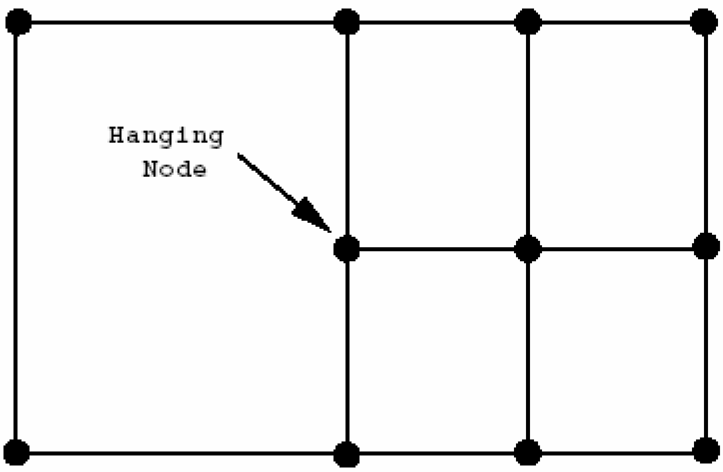


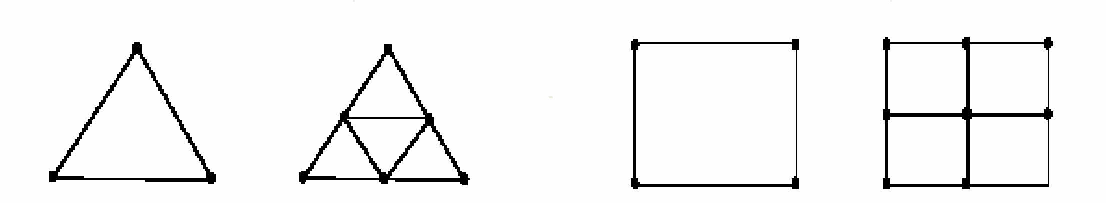
图 23.2.4　一个 Hanging node 节点的例子

Hanging node（悬空节点）的细化

通过各向同性细分每个标识符为细化的网格，图 23.2.5 与 23.2.6 介绍了下列被支持的网格的细化。

1） 一个三角形网格分成 4 个三角形网格
2） 一个四边形网格分成 4 个四边形网格
3） 一个四面体网格分成 8 个四面体网格。这细化包括修剪四面体的每个角，然后引入最短对角线来细化封闭的八面体。
4） 一个六面体分成 8 个六面体
5） 一个楔形体（菱柱）分成 8 个楔形
6） 一个锥体分成 6 个锥体与 4 个六面体

为确保正确性，相邻网格没法区别多于一个级别的细化。这样可防止自适应产生过多的网格体积变化（减少截断误差）并且可确保“parent”(原来的)和“child”(细化后的）网格的质心位置相似（减少通量赋值误差）。

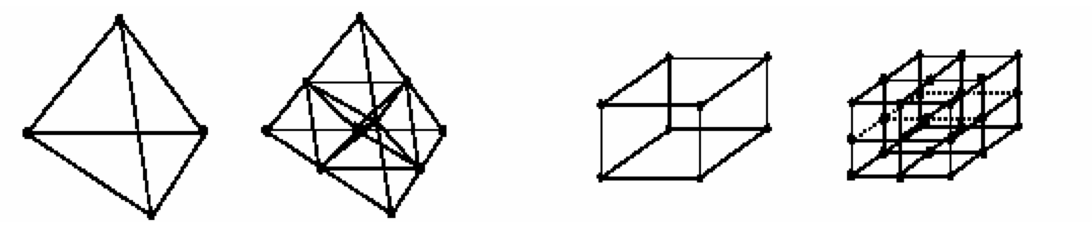


三角形　　　　　　　　　　　　　　四边形

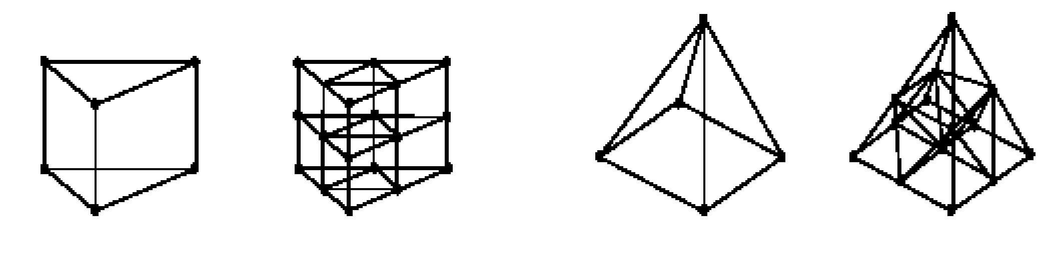
图 23.2.5　二维 Hanging Node 自适应网格单元类型

Hanging Node 粗化

通过再次引入不激活父级单元来粗化网格，也就是说，粗化子集单元可以回收以前细化的父级网格单元。如果它所有的子网格被标记为粗化，则一个非激活父级单元被回复。你重复应用 hanging node 粗化网格最终可收回初始网格。你无法再进一步用 hanging node 自适应方法来粗化初始网格。但是 conformal 粗化网格允许你去掉初始网格点以便减少网格密度。



四面体　　　　　　　　　　　　　　六面体



楔形/ 菱柱　　　　　　　　　　　　　　锥体

图 23.2.6　三维 Hanging Node 网格类型

23.2.3　conformal 自适应

　　细化网格自适应过程没有创造悬空（hanging）节点。相反，所有网格有共同的包括再这些实体上所有节点边或面。这 conformal 细化过程在边上增加节点并且 conformal 粗化网格去掉节点并且再次对生成的空腔三角形化。

Conformal 细化

为了细化网格，可以边界或内部面（包括周期性边界面）分成几部分。图 23.2.7 显示了记为 A 三角形被分割细化。它是通过对三角形或四面体的边长二等分来细化网格的。这技术有两个好处：这过程是保守的并且它不要求插值要得到新网格计算向量。对倾斜网格的重复细化没有连续增加网格偏斜度。

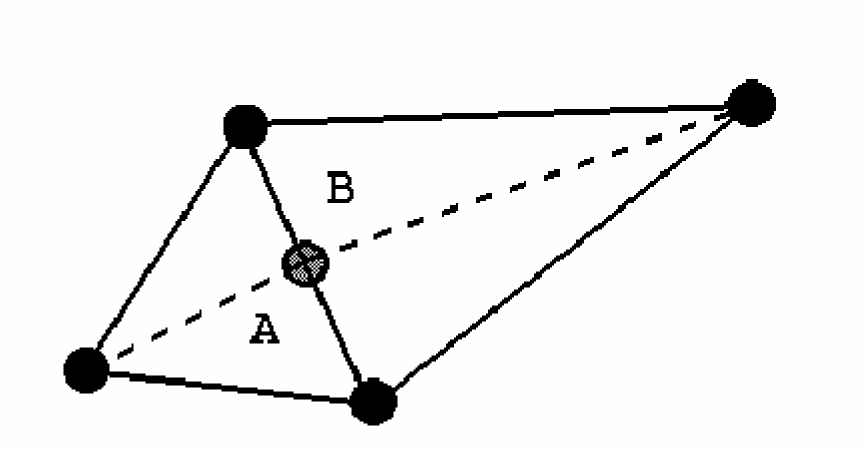


图 23.2.7　通过边长二等分来细化网格单元

这个方案找到任何标记符为细化的网格单元的最长的边。然后访问每个包括那条边的网格单元并且搜索一条更长边。如果任何一个相邻网格有一条更长的边，那就要围绕着新的边搜索一条更长的边。一旦搜索到了最长的那天边，然后就对这边最长的边。尽管这过程保持了用重复操作分成的三角形的品质，它能造成许多没有标记为细化的网格被分割了。比如，图 23.2.8 显示了标记为细化（用 X 标记）的初始网格，图 23.2.9 显示了用细化过程创建的最终网格。

Conformal 网格粗化

通过去掉标识为粗化的网格共同享有的节点，达到网格粗化。如果与这节点连接的所有网格单元都被标识为粗化，那求解器将去掉这节点。每个为去掉而标识的节点都尝试着进行下面局部的三角形化的过程。

1、产生一列有标记节点的单元的列表。去掉这些单元会创造一个必须被三角形化的空腔。
2、产生一列空腔终的面
3、产生一列在空腔边界上的面
4、如果去掉了一个边界上的节点，产生一个新的边界三角形并且把这些面加入到空腔上面列表。
5、从空腔中的面列表中，创造了一个新的 Delaunay 三角形化网格。（在 TGrid 的用户帮助中的理论章节，描述 Delaunay 三角形化）
6、如果这过程成功的话，在区域中初始三角形节点，面和单元都会被删除。
7、为了避免在同一个区域连续的粗化，把与空腔所有有关联的节点从标记节点的列表中被删除
8、体积平均法计算在新单元中计算变量。

图 23.2.10 说明了点 n1 节点的去除和三角形化。在这个例子中，与这节点连接的包括 c1，c2，c3， c4 和 c5 的网格单元列表；空腔内包括 f6，f7，f8，f9 和 f10 在内的面的列表；在空腔上包括 f1，f2，f3，f4 和 f5 的面的列表。这新的三角形化的面是 f11 和 f12，和新的单元 c6，c7 和 c8。

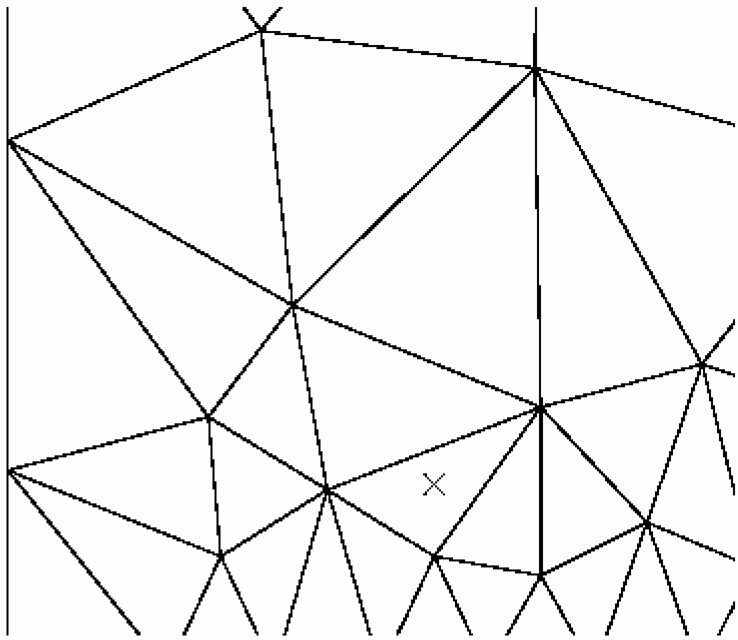


图 23.2.8　带开一个细化标识的网格单元的初始网格

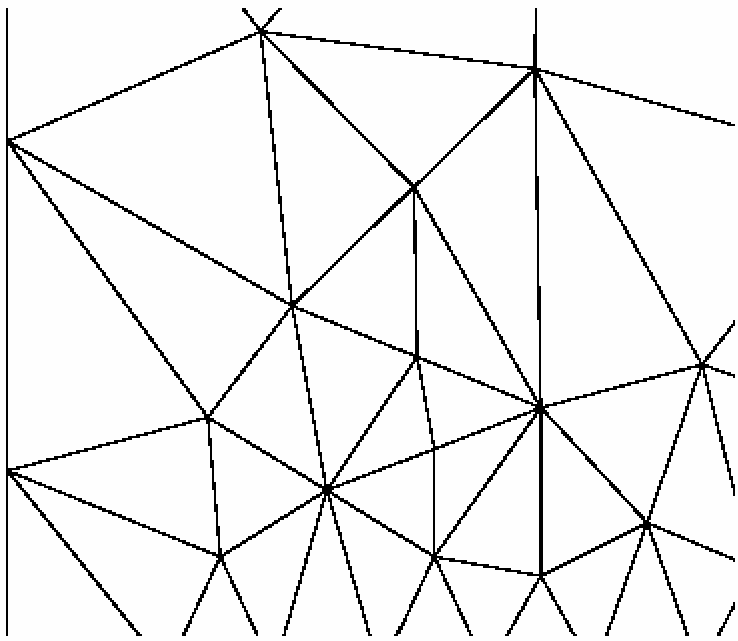


图 23.2.9　细化后的最终网格

我们称细化引入的节点为细化节点。细化之前就存在的网格上的节点我们称为初始节点。默认情况下，在粗化过程中只有细化节点能被去掉，但是通过重新设置节点的标记，你就能去掉任何一个节点。关于节点标记的更多的信息可以参考 23.10 部分。

目前，fluent 的版本只有在二维中实现网格粗化方案。

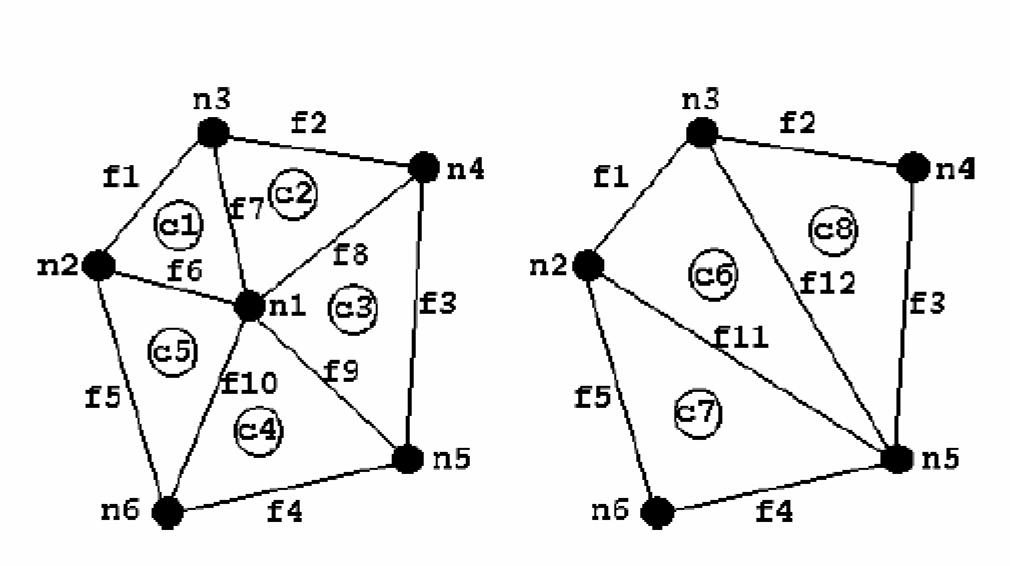


图 23.2.10　通过去掉节点和区域三角形化来粗化的网格

23.2.4　Conformal 和 Hanging Node 自适应

对大多数问题，hanging node 自适应可提供网格自适应的最大灵活性。然而，下面几点可以帮助你在特定的应用中如何选择合适的自适应类型。

1） conformal 自适应方法只能用在三角形和四面体网格中，而 hanging node 自适应方法能用在所有支持的网格形状。
2） hanging node 自适应方法比 conformal 自适应方法在本质上更局部化。在 conformal 自适应方法中，许多加入标识单元列表中的许多网格单元可通过分割最长边标准被细化。对高级网格，初始匹配细化将展示大量细化网格的产生，有时改善许多还远离有细化标识符的网格。（For highly graded grids, the initial conformal refinement sweeps tend to exhibit substantial propagation of the cell refinement, sometimes refining the grid many cells away form the actual cell marked for refinement.）。（通常在本质上随后的细化是更局部的。）这 hanging node 方案仅仅是维持细化水平差异，这也是有很多限制的。
3） 初始网格的联通性被限制在 hanging node 自适应方案中，但是这 conformal 自适应方法将修改细化或粗化网格的联通性。用在带周期性行为的非稳态问题（比如，圆柱后面的脱体点）中，如果你进行连续的细化和粗化，这可能有准确的含意。然而，只有 conformal 粗化网格才允许你粗化初始网格，并且只有在二维情况下。
4） 在三维，hanging node 自适应有一个跟保持网格层次和暂时存储边相关的存储空间补偿。Conformal 自适应除了为了增加网格密度而增加的节点，面和单元信息存储之外就没有多余的存储空间。

23.3　边界自适应

如果在边界上要求更多的单元，就可以采用边界自适应来实现。边界自适应函数允许你在选定的边界区域附近标记或细化单元。因为流体相互作用常常出现在这些区域，比如在靠近避免的边界层有很大的速度梯度，所以它可以在靠近一个或多个边界域进行网格细化。

23.3.1　边界自适应的例子

图 23.2.1 显示了一个用边界自适应方法来盖上网格的例子。这网格在阶梯的垂直面上只有两个单元。在跟阶梯垂直面上相关区域的边界自适应增加了单元数目，如图 23.3.2 所示。注意这过程不能用于增加曲面分解情况。因此，如果在一个表面形状重要的曲面上要求更多网格，更好在读入求解器前就创建了足够节点的网格。

23.3.2　边界自适应的步骤

边界自适应有三种不同方法：

1）边界自适应是根据单元离开边界的距离来确定单元数目

2）边界自适应是在单元离开边界的垂直距离基础上

3）边界自适应是在目标边界体积和增长因子的基础上

你可以在边界自适应面板上利用任何一种方法。（见图 23.3.3）



每种方法使用的步骤如下：

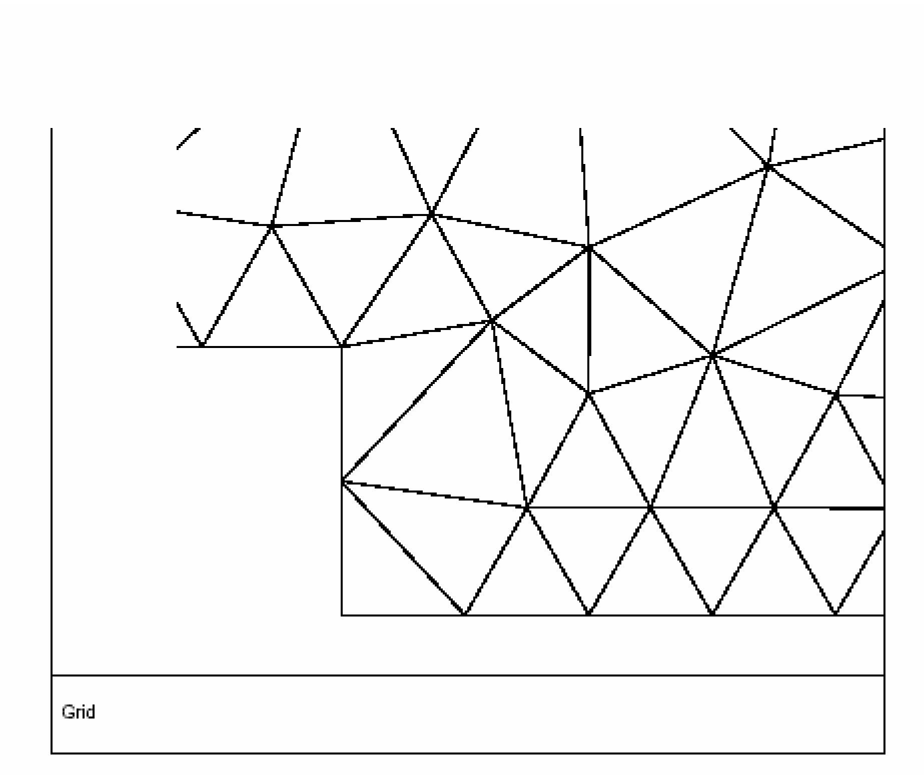


图 23.3.1　自适应前的网格

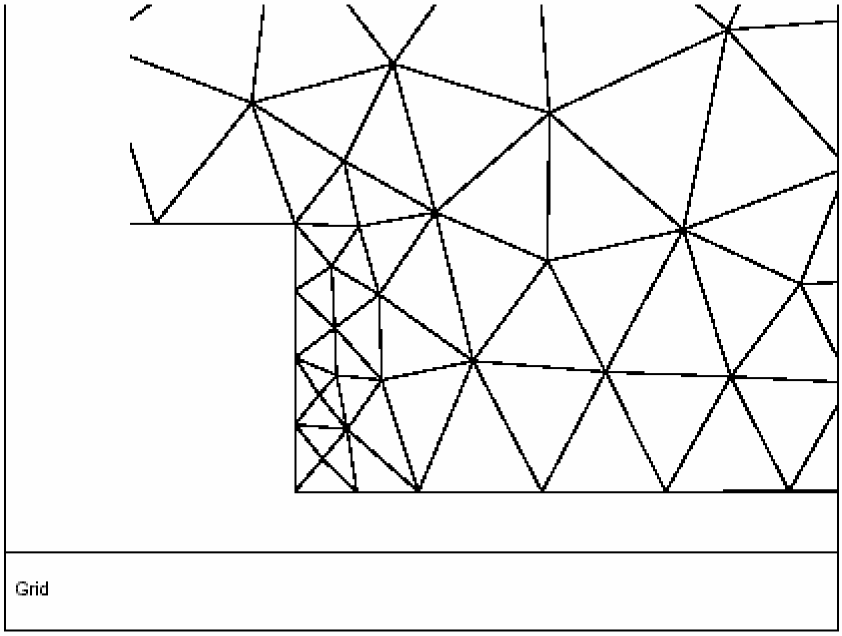


图 23.3.2　　边界自适应后的网格

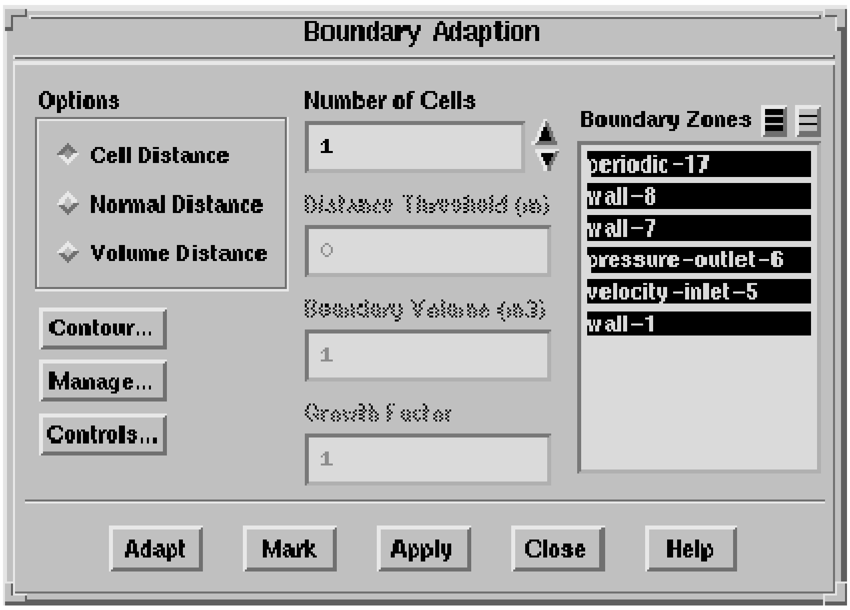


图 23.3.3　　　边界自适应面板

基于单元数的边界自适应

基于根据单元数确定的单元到边界的距离的边界自适应方法的执行一般过程如下：

1）在 Boundary Adaption panel（边界自适应面板）上，在Options种选择 Cell Distance，在Boundary Zones list种，选择靠近你象改善网格的边

界域，然后点击 Apply。

2） 通过点击 Contour... 按钮，打开 Contours 面板。

3） 在 Contour... 面板上，选择 Filled，不选择Node Values，在Contours Of 的下拉菜单列表中，选择Adaption... 和 Boundary Cell Distance。选择合适的面（只有在三维时），然后点击 Display 来看带每个边界单元距离值的网格单元的位置图。通过显示不同值的范围（在 25.1.2 部分中描述了），你能决定你想自适应的网格单元的单元距离。

4） 在 Boundary Adaption 面板上，在需要值中设定 Number of Cells，如果你保留了默认值 1，仅仅是这些有边（二维）或面（3 维）在指定边界区域上的网格单元会被做标记或自适应。如果你增加值到 2，则带边界距离为 2 的网格单元也将被做标识或自适应，依此类推。

5） （可选）如果你想设定任何自适应选项（在 23.10 部分中描述了），点击 Controls... 按钮来打开 Grid Adaption Controls 面板。

6） 通过在自适应寄存器中设置（它是可操作的，在 23.9 部分中有描述），点击 Mark 来对要细化的单元做标识，或者点击 Adapt 来实现立即细化。

基于垂直距离的边界自适应

基于单元到边界的垂直距离的边界自适应方法的执行一般过程如下：

1） 在 Boundary Adaption 面板上，在 Options 中选择 Normal Distance，在 Boundary Zones list 中选择你想要细化单元的边界域，并点击 Apply。

2） 通过点击 Contour... 按钮来打开 Contours 面板。

3） 在 Contours 面板上，选择 Filled contours，不选择 Node Values，选择 Adaption... 并在 Contours Of 的下拉菜单中选择 Boundary Normal Distance，选择合适的表面（仅在三维中），并点击 Display 来查看带每个垂直距离值的单元的位置。通过显示不同的值范围（在 25.1.2 部分中有描述），你能决定哪些垂直距离的单元要被自适应。

4） 在 Boundary Adaption 面板中，设定 Distance Threshold 到你想要的值。带到选定的边界域的垂直距离少于和等于这个值的单元将被做标记和自适应。

5） （可选）如果你想设定任何自适应选项（在 23.10 中有叙述），点击 Controls... 按

钮打开Grid Adaption Controls面板。

（6）通过在自适应寄存器中设置（它是可操作的，在 23.9 部分中有描述），点击 Mark 来对要细化的单元做标识，或者点击 Adapt 来实现立即细化。

基于目标边界体积的边界自适应

边界自适应允许你基于目标边界单元体积和一个指数增长函数来实现细化网格。这允许你产生带有靠近选定壁面的目标体积单元和进一步从壁面得到的指数增大（或缩小）单元的网格。标识细化网格单元基于下面方程：

$$V_n > V_{\text{boundary}} e^{\alpha d} \qquad (23.3\text{-}1)$$

其中，V_n 标识单元体积，V_{boundary} 标识选定的边界体积（Boundary Volume），α 是指数增长因子（Growth Factor），d 是单元质心到选定的边界间的垂直距离，$V_{\text{boundary}} e^{\alpha d}$ 是单元目标体积。

边界细化类型的一般程序如下：

1）在 Boundary Adaption 面板上，在Options中选择 Volume Distance，设定 Boundary Volume 和想要体积值的Growth Factor，在Boundary Zones下拉菜单，选择你想应用 Boundary Volume 的边界域，并且点击Apply。

2）通过点击 Contour... 按钮来打开Contours 面板。

3）在 Contours 面板上，选择 Filled contours，不选择 Node Values，选择 Adaption... 并在 Contours Of 的下拉菜单中选择 Boundary Volume Distance，选择合适的表面（仅在三维中），并点击Display 来查看目标体积的等值线。你能修改任何一个输入的值（Boundary Volume，Growth Factor 和（或）Boundary Zones），在 Boundary Adaption面板上，然后重新显示等值线图来查看修改的目标体积的分布。

4）（可选）如果你想设定任何自适应选项（在 23.10 中有叙述），点击 Controls... 按钮打开Grid Adaption Controls面板。

5）在自适应寄存器中设置（它是可操作的，在 23.9 部分中有描述），点击 Mark

来对要细化的单元做标识，或者点击 Adapt 来实现立即细化。

23.4　梯度自适应

梯度自适应函数允许你基于选择场变量的梯度（未分配 Laplacian）标记单元或调整网格。

23.4.1　梯度自适应方法

自适应方法网格细化的主要目标是在数值计算中有效地降低数值误差，不幸的是，由于在自适应的网格中正确估计和模拟这误差的复杂性，点插入自适应方案的直接误差估计是困难的。假设最大误差出现在高梯度区域，易于获得的运动流场的物理特征用来推进网格自适应过程。FLUENT 采用均布自适应技术是通过一个标尺长度乘以选择计算变量的未分配 Laplacian【256】。这标尺长度是单元体积的平方根（二维）或立方根（三维）。标尺长度的引入就允许计算强和弱的扰流，增加更加准确计算的潜力。然而，在 Grid Adaption Controls 面板上（详见 23.10 部分）通过改变梯度 Volume Weight，你能减少和降低体积权重。例如，在二维中的梯度函数可表示成下面形式：

$$|e_i| = (A_{\rm cell})^{\frac{r}{2}} |\nabla^2 f| \qquad (23.4\text{-}1)$$

其中，e_i 是误差指针，$A_{\rm cell}$ 是单元面积，r 是体积梯度权重（gradient volume weight），$\nabla^2 f$ 是你想要的流场变量的 undivided Laplacian。跟全体积权重相应的体积梯度权重的默认值是一致的；0 值将消除体积权重；在 0 与 1 之间的值是采用合适的体积权重。

在梯度自适应函数中可用任何一个流场变量作等值线。有趣的是，这些标量函数包括数值计算的几何和物理特征。因此，另外，对物理特征的传统自适应，比如速度，你可以选择适应网格单元体积场来减少单元体积的快速变化。

23.4.2　梯度自适应例子

围绕圆柱的超音速流的计算是一个梯度自适应的很好的例子。图 23.4.1 所示的初始网格是很粗糙的，甚至它还么有足够的网格单元数来描述圆柱的形状。在圆柱前端的网格太粗糙了以至于没法解决圆柱前端的冲击尾流。在这个例子中，因为在冲击区有一个压力的跳跃，很显然在这里压力作为梯度自变量的一个合适的变量。然而在恰当的计算之前有必要进行几步自适应。图 23.4.2 所示为自适应后的网格。

就象上面例子一样涉及非连续性的混合层可以说是一个对不可压缩流体的梯度自适应的典型应用。

23.4.3　进行梯度自适应的步骤

在梯度自适应面板（见图 23.4.3）上你可进行梯度自适应。

Adapt ⟶ Gradient...

执行梯度自适应的一般过程如下：

1）在 Gradient Adaption 面板上，在 Gradients Of 的下拉菜单中选择想要的计算变量，然后点击 Compute。

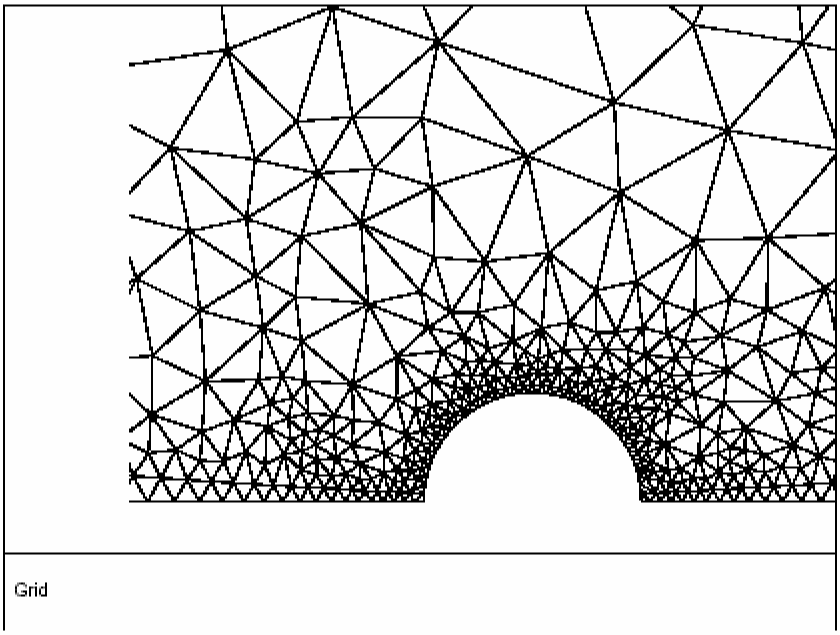


图 23.4.1　非流线形体自适应前的网格

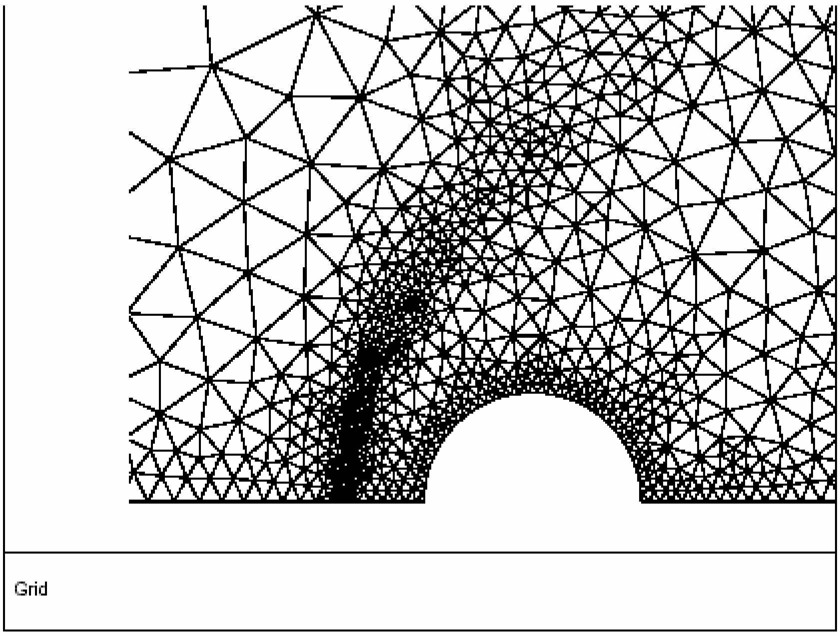


图 23.4.2　非流线形体进行梯度自适应后的网格

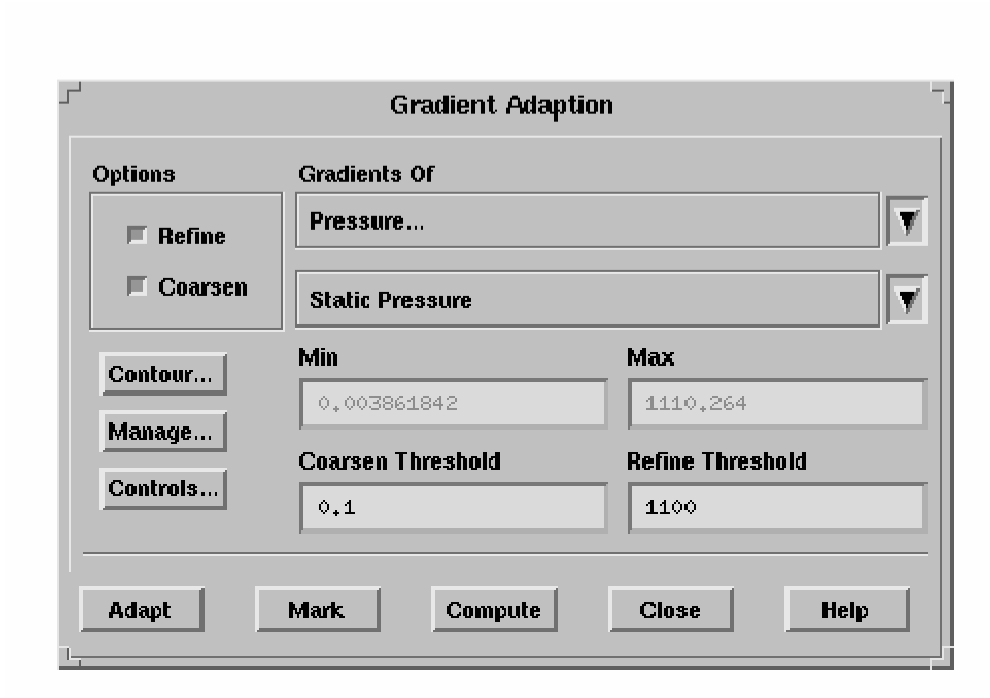


图 23.4.3　梯度自适应面板

2）通过点击 Contours 按钮，打开 Contours 面板

3）在 Contours 面板上，选择 Filled contours，不选择 Node Values，选择 Adaption...，并在 Contours Of 的下拉菜单中选择 Existing Value，选择合适的表面（仅在三维中），并点击 Display 来查看每个带梯度值的单元的位置。通过显示不同范围的值（见 25.1.2 部分的描述），你能觉得你想要自适应网格的梯度范围。

4）在这 Gradient Adaption 面板上，选择 Refine Threshold。在带这个值上以上的梯度值的单元就会被做标识或细化。

5）如果你想粗化网格，在 Coarsen Threshold 中设置 0 值。带在这个确定的值以下的梯度值的单元就会被标识或粗化。

注意如果你用 hanging node 自适应（默认的）方法，你将不能创建比初始网格更粗的网格。为此，你必须使用 conformal 自适应方法。还要注意的是 conformal 粗化只能用在二维或轴对称几何体中的。详细参考 23.10 部分。

6）（可选）如果你想设定任何自适应选项（在 23.10 中有叙述），点击 Controls... 按钮打开 Grid Adaption Controls 面板。

7）在自适应寄存器中设置（它是可操作的，在 23.9 部分中有描述），点击 Mark

来对要（细化或粗化）自适应的单元做标识，或者点击 Adapt 来实现立即细化。如果你想要不进行细化或粗化，或者要进行细化或粗化，你可以在做标识或自适应前关掉 Refine或 Coarsen 选项。

23.5　等值自适应

一些流体可以包括一些容易用某个量的值识别的流动特征。例如，尾流就出现了一个明显的总压差，并且射流是可用相对高速流层来识别。由于这些包括重要流动量（比如在湍流中的 k和 ϵ 量）的大梯度，与在单个流动变量梯度上改善网格相比它可能是更方便地在相对流动量上用一个等值自适应。

等值自适应函数允许你在一个的被选择流场变量函数的确定范围的之内或之外标记或完善网格。这网格能基于几何与（或）计算矢量数据上被细化或细化标记。特别是，在流场变量的显示列表的任何量能被用来等值自适应。一些关于你如何使用等值标识/自适应特性列于下面：

1） 用等值或二次函数创建 mask
2） 修改有在一确定范围内的速度大小的网格单元
3） 可以快速标记并显示带在决定哪里进行数值计算的需求范围之外的压力或连续性残差的单元。

用等值自适应函数的方法来计算每个单元的特定值（速度，二次函数，x 轴质心，等），然后访问每个有值在规定范围之内（或之外）的细化标记的网格。

23.5.1　等值自适应例子

等值自适应发挥作用的一个问题作为例子，见图 23.5.1。用等 x 速度线显示一个喷射问题的网格。基于 x 方向速度的等值自适应只允许在在喷射下的网格细化，结果见图 23.5.2。！当为了防止产生大的单元体积梯度而对等值进行自适应时必须要小心。象 23.1 部分有介绍，这能影响精确性和防碍收敛。一个方法是通过调整单元体积的大梯度来调整单元体积的变化，这在 23.7.2 部分中有介绍。

23.5.2　执行等值自适应的步骤

在 Iso-Value Adaption 面板上你开始执行等值自适应（见图 23.5.3）

Adapt ⟶ Iso-Value...

下面列出了等值自适应方法的一般步骤：

1） 在 Iso-Value Adaption 面板上，在 Iso-Values Of 的下拉菜单中选择你想要的计算变量，并点击 Compute 来打开最大和最小流场。

2） 选择 Inside or Outside 选项并设置 Iso-Min 和 Iso-Max 的值。

① 如果你选择 Inside，带在 Iso-Min 和 Iso-Max 之间的等值的单元就会被做标记或调整。

②如果你选择 Outside，拿带小于 Iso-Min 或大于 Iso-Max 的单元就会被做标记或

调整。

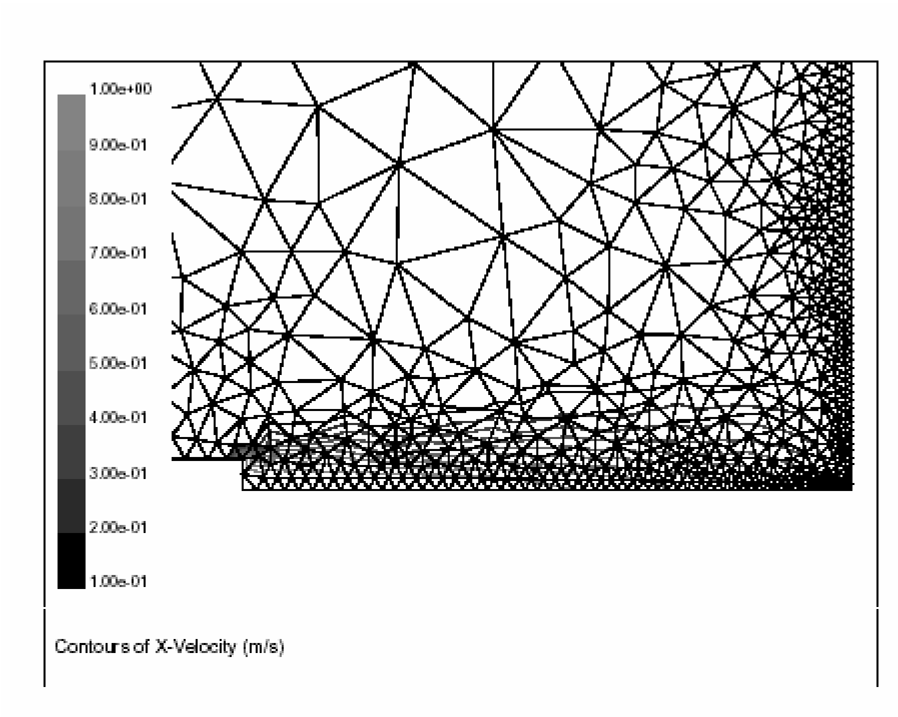


图 23.5.1　自适应前跟等 x 速度线一起显示的喷射网格

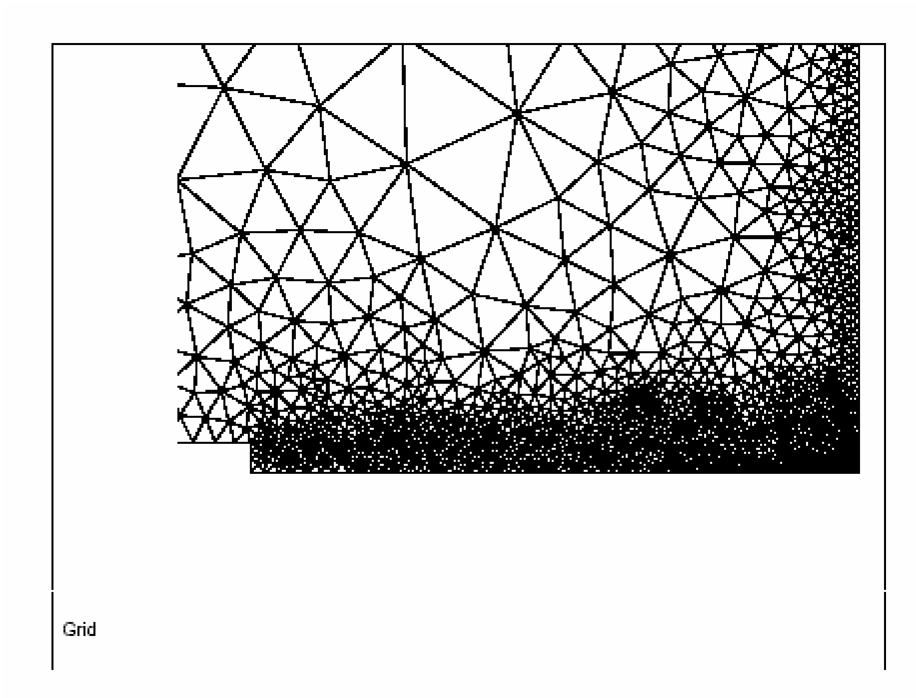


图 23.5.2　等值自适应后的喷射的网格

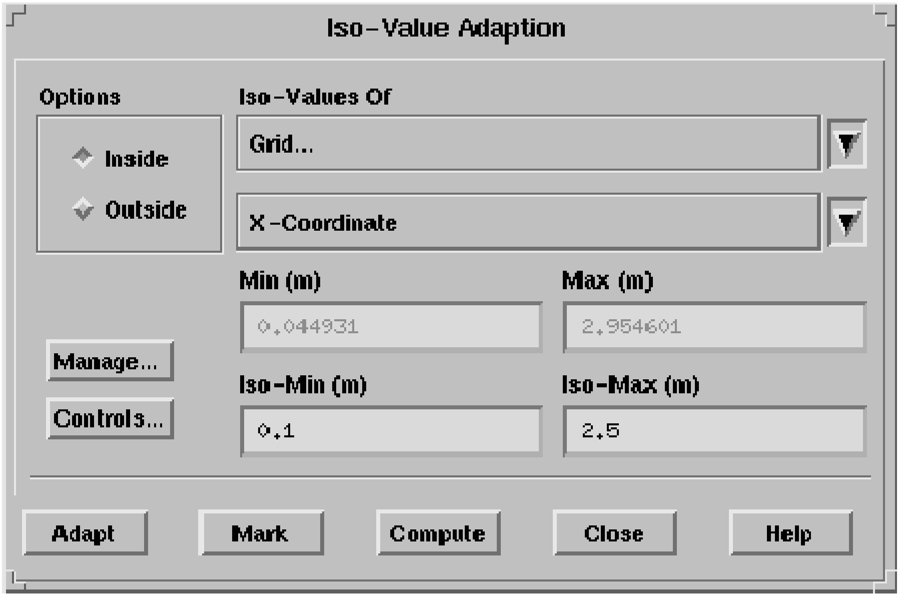


图 23.5.3 Iso-Value Adaption 面板

3）（可选）如果你想设定任何自适应选项（在 23.10 中有叙述），点击 Controls... 按钮打开 Grid Adaption Controls 面板。

4）在自适应寄存器中设置（它是可操作的，在 23.9 部分中有描述），点击 Mark 来对要自适应的单元做细化标识，或者点击 Adapt 来实现立即细化。

23.6　区域自适应

许多网格生成器生成随着离开边界距离增加而迅速增大的单元体积的网格。而这实际上可避免一些过密网格，如果网格没有足够的精细而不能解决流动问题，那么这就会引起一些问题。但是如果在某个计算区域要求更细网格，那么网格就可以用区域自适应方法来满足要求。

区域自适应函数是在一个通过鼠标或文本输入方式定义的内部或外部区域中标记或细化网格。目前，可细化或标记的网格可以是内部或外部的一个六面体（或在二维中的四边形），一个球形（在二维中是圆形）或这个圆柱。基于区域的标记或自适应特征对直觉要求好的计算结果的细化区域（比如钝体流场的尾流区域）是特别有用的。另外，你能区域标记或创建能用来限制细化或粗化程度的自适应选择寄存器。

23.6.1　一个区域定义

区域自适应函数的一个基本的方法是首先定义一个六面体（四边形），球形（或圆形），或圆柱区域。你将通过输入定义了对角线的相应的两点来定义六面体。通过输入相应的球的中心和半径来定义球形（或圆形），为了定义圆柱，你将确定定义了圆柱中心轴的相应的点

和半径。在三维中，这就定义了一个圆柱。在二维中，你将有一个任意方向的长等于圆柱轴线长并且宽等于半径的矩形。采用圆柱选项定义的一个矩形不同于一个用四边形选项定义的矩形，因为前者可以是在主体中的任意方向，而后者必须是跟坐标轴并排的。

你可以在合适的真实体场输入精确的坐标也可以用鼠标在网格和计算场的显示中或者选择位置。区域定义好了之后，内部/外部确定区域每个有质心的网格将被做细化标记。

23.6.2 区域自适应例子

图 23.6.1 显示了一个围绕一扁平机翼的流动计算用而创建的网格。这网格在机翼表面附近很精细，以便计算粘性影响区域。然而，网格从机翼往外增长很快，出现在翼的吸入表面分离的流动情况就很难预测。围绕这个问题，网格在围绕这翼的圆域（用鼠标探测器选择）内进行调整。结果如图 23.6.2 所示。注意当区域自适应进行时，它会限制自适应的最小网格体积（23.10 部分中有叙述）以防止在靠近表面出现很小的网格单元而要进一步的调整。

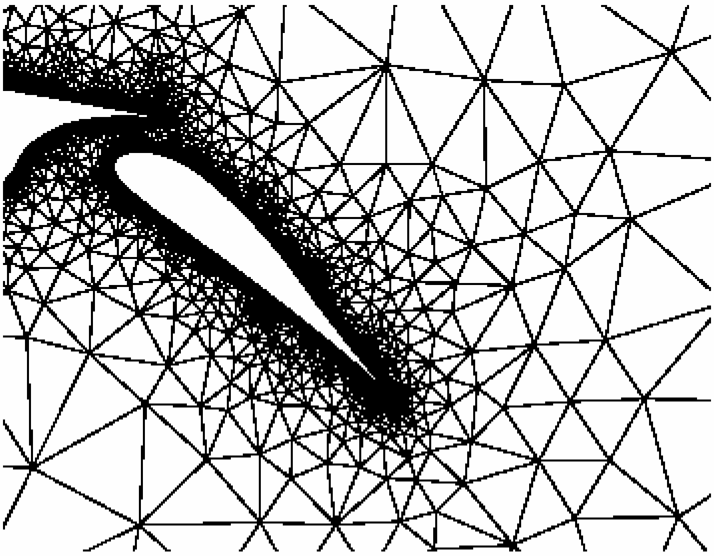


图 23.6.1 平机翼自适应前的网格

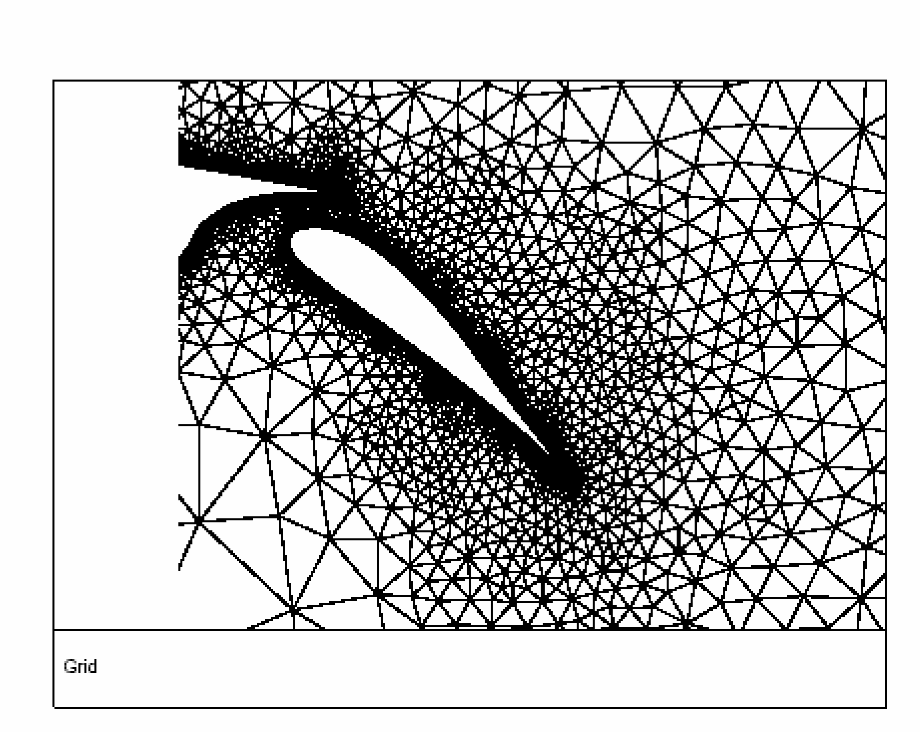


图 23.6.2　区域自适应后的平机翼网格

23.6.3　进行区域自适应的步骤

在 Region Adaption 面板（见图 23.6.3）上，你将进行区域自适应。

Adapt ⟶ Region...

执行等值自适应的一般过程如下：

1）在 Region Adaption 面板上，选择 Inside or Outside 选项。

① 如果你选择 Inside，在确定区域之内带质心的单元就会被做标记或完善。

②如果你选择 Outside，在确定区域之外带质心的单元就会被做标记或完善。

2） 确定区域形状。在二维中，你可以选择四边形，圆形或圆柱形。在三维中，你可以选择六面体，球形或圆柱。



图 23.6.3 Region Adaption 面板

3）通过在面板上用鼠标输入值来定义区域

在面板上要输入的项目有：

① 为定义六面体或四边形，你要输入相关两点定义它对角线：如是六面体，则输入（最小 x 值，最小 y 值，最小 z 值）和（最大 x 值，最大 y 值，最大 z 值）；如是四边形，则输入（最小 x 值，最小 y 值）和（最大 x 值，最大 y 值）。

② 为定义球形和圆形，你要输入球形的坐标中心点－（Xcenter，Ycenter，Zcenter）或圆形的（Xcenter，Ycenter），并且还都要输入半径。

③为定义圆柱，你要输入定义圆柱坐标轴的最小和最大相关点－对三维（X-Axis Min，Y-Axis Min，Z-Axis Min）和（X-Axis Max,Y-Axis Max,Z-Axis Max），或者对二维（X-Axis Min,Y-Axis Min）和（X-Axis Max,Y-Axis Max），二维三维都要输入圆柱半径，（在二维中，这就是生成的矩形的宽。）

为用鼠标定义区域，点击 Select Points With Mouse 按钮。用鼠标探针（默认为鼠标右键），你可以从一个网格和计算场的显示中选择输入坐标。关于鼠标键功能可以参考 25.3 部分。你选择了点之后，值就会自动出现在面板上合适的地方。如果你想，你可以在标记和自适应前编辑这些值。

① 为定义六面体和四边形，你能以任意顺序选择对角线的两点

② 为定义球形或圆形，首先选择质心的位置，然后选择在球形（或圆形）上的一点（比如，在离开质心的一条半径上的一点）。

③ 为定义圆柱，首先选择定义了在圆柱轴上的两点，然后选择离开轴的一条半径上的一点。

4）（可选）如果你想设定任何自适应选项（在 23.10 中有叙述），点击 Controls... 按钮打开 Grid Adaption Controls 面板。

5）在自适应寄存器中设置（它是可操作的，在 23.9 部分中有描述），点击 Mark 来对要自适应的单元做细化标识，或者点击 Adapt 来实现立即细化。

23.7 体积自适应

如 23.1 部分中所提的，单元体积逐渐变化的网格是计算精度最高也最容易收敛的网格。如果创建或自适应网格没有生成这样的网格，则可以选择基于或者网格单元体积或本单元与相邻单元的体积之间的变化上的体积自适应方法来改善网格。

23.7.1 方法

基于体积大小来标记或调整网格方法是在去掉大网格或为全球调整网格上最常见的的一种方法。这过程就是来对比规定域值更大的体积的任何一个细化单元做细化标记。

基于改变单元体积变化的网格标记或调整是用了改善网格的光顺性。这过程对比规定域值更大的体积的任何一个细化单元做细化标记。通过在面或该面与邻面之比率循环来计算体积变化。比如图 23.7.1，比例 $V1/V2$ 和 $V2/V1$ 跟域值相比较。比如，如果 $V2/V1$ 是比域值大，那么 $C2$ 就会被做细化标记。

23.7.2 体积自适应例子

为了计算湍流喷口而创建了图 23.7.2 中的网格。在 TGrid 中使用的局部细化用来创建一个在喷口局部很好的网格，但是在别处粗化。这就在喷口边上创建了一个非常陡峭的的单元体积变化。

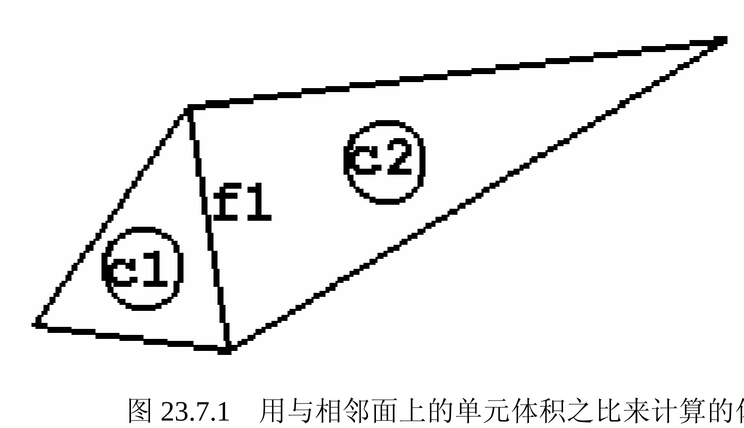


图 23.7.1 用与相邻面上的单元体积之比来计算的体积变化

为了改善网格，用最大单元体积变化应该小于 50％这一标准的体积自适应来改善网格。子实对最小单元体积是有限制的。光顺化和和交换之后的网格显示在图 23.7.3。从图上我们很容易看到在喷口内调整区域和周围的网格的界面就不会象以前那么陡峭了。

23.7.3 执行体积自适应的步骤

你可在 Volume Adaption 面板（如图 23.7.4 所示）上实现体积自适应。

Adapt ⟶ Volume...

体积自适应方法的一般过程如下所示：

1） 在 Volume Adaption 面板上，确定是否你将基于通过选择 Magnitude 或 Change 选项的体积大小和体积变化自适应。

2） 点击 Compute 可以升级 Min 和 Max 框。这些框中就会显示单元体积和单元体积变化（在 23.7.1 部分有定义），依赖于你第一部的选择。

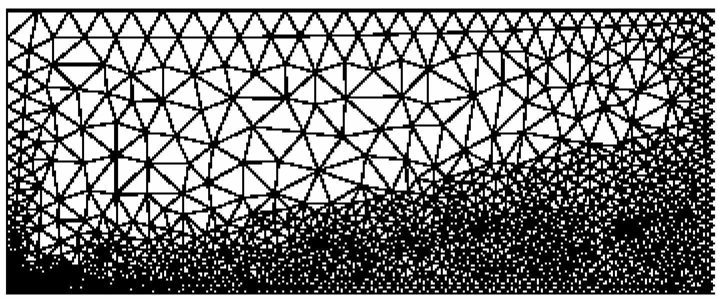


图 23.7.2 自适应前的喷口网格

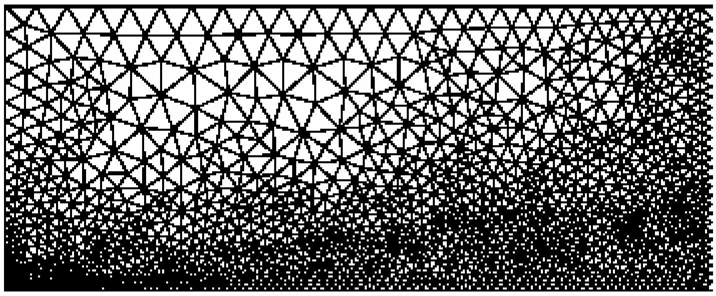


图 23.7.3　基于网格体积变化的自适应的喷口网格

3）　设置 Max Volume 或 Max Volume Change 值。 如果你已经选择基于体积大小的自适应，那么比 Max Volume 更大体积的单元就会比标记或调整。如果你正进行基于体积变化的自适应，带体积变化比 Max Volume Change 更大的单元就会被标记或调整（或细化）。

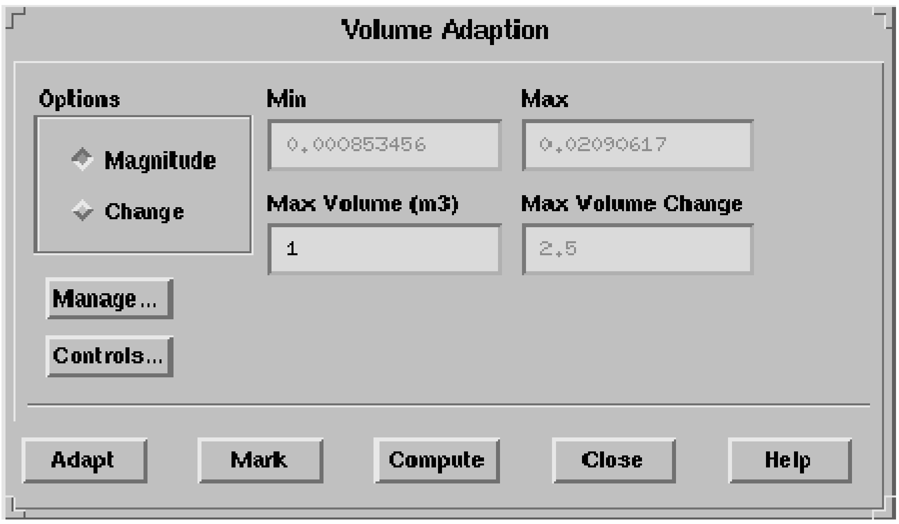


图 23.7.4　Volume Adaption 面板

4）（可选）如果你想设定任何自适应选项（在 23.10 中有叙述），点击 Controls... 按钮

打开Grid Adaption Controls面板。

5）在自适应寄存器中设置（它是可操作的，在 23.9 部分中有描述），点击 Mark

来对要自适应的单元做细化标识，或者点击 Adapt 来实现立即细化。

23.8 y^+ 和 y^* 自适应

FLUENT 提供了对湍流的近壁面模型三个不同选项（标准壁面函数，非平衡壁面函数，和强化壁面处理）。如 10.9 部分中叙述的，对这些壁面模型选项的每个都有某些特定的要求。

由于当创建网格时，规定近壁处计算要求常常是很困难的，所以在计算过程中 y^+ 和 y^* 自适应提供了能细化和粗化沿壁面的网格的能力。如果你用强化壁面处理，你会采用 y^+；如果你采用壁面函数，你可以采用 y^+ 或 y^* 。

23.8.1 方法

这方法用来在规定的粘性流体壁面区域的边界网格单元上计算 y^+ 和 y^* ，并且标记和（或）调整合适的网格单元。小于最小允许域值的 y^+ 或 y^* 值的单元就会被做标记粗化，大于最大允许域值的 y^+ 或 y^* 值的单元就会被做标记细化（除非已经没有能力粗化或细化了）。

23.8.2 y^+ 自适应例子

图 23.8.1 显示了带壁面顶部边界和底部边界组成的一个对称面的管道流的网格。在初次计算后，如果在壁面边界上单元的 y^+ 值太大，就采用 y^+ 自适应是用来调整它们。这样生成的网格如图 23.8.2 所示。这图显示了在细化网格的过程中沿着壁面边界的单元的高度已经减小。然而，细化后在壁面上单元尺寸分布的均匀性就比初始网格差，这就是 y^+ 自适应的不利影响。

参考 10.9 部分的指南中关于在不同的近壁面 y^+ 和 y^* 的推荐值。

23.8.3 进行 y^+ 或 y^* 自适应的步骤

你打开Y+/Y* Adaption面板（见图 23.8.3）就可以进行 y^+ 或 y^* 自适应。

Adapt ⟶Y+/Y*...

下面列出了进行 y^+ 或 y^* 自适应的一般步骤：

1）在 Y+/Y* Adaption 面板上，选择 y^+ 或 y^* 作为自适应 Type。（如果你正采用了强化壁面处理，那么就选择 y^+；如果你选择了壁面函数，那么你就可以选择任何类型）

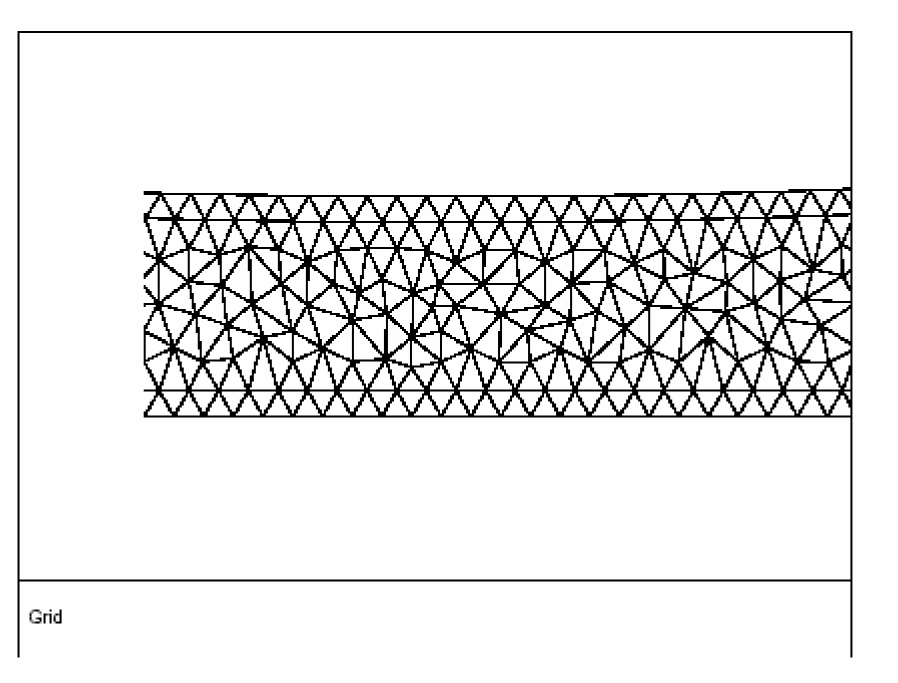


图 23.8.1　自适应前的管道流网格

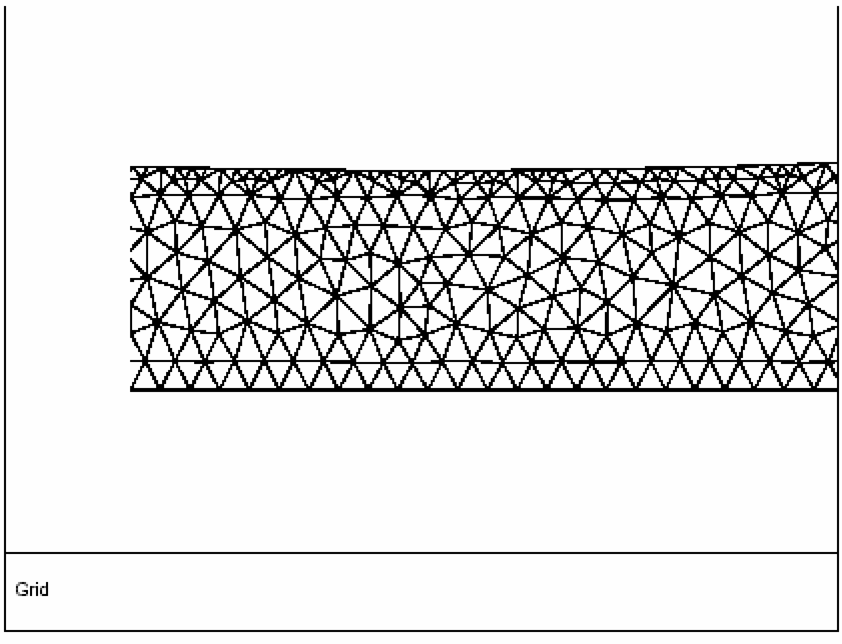


图 23.8.2　y^+ 自适应后的管道流网格

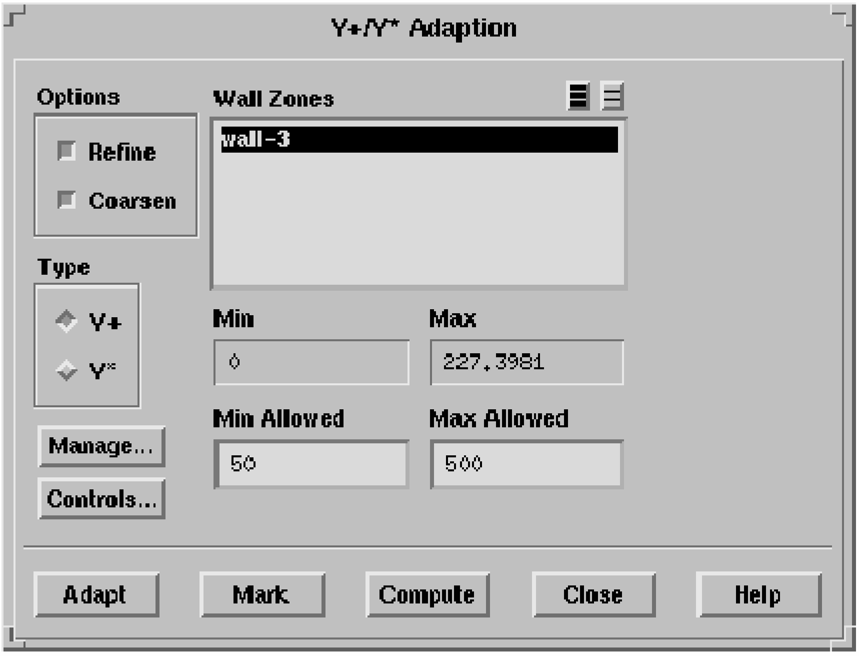


图 23.8.3 Y+/Y* Adaption面板

2） 在 Wall Zones list，选择你想要标记或自适应的边界网格的壁面区域，然后点击 Compute 来升级 Min和Max框。（注意显示的值是所有壁面的最小和最大值，而部仅仅是选择的值。）

3）设置 Min Allowed 和 Max Allowed 单元。在带 Min Allowed 以下的 y^+ 或 y^* 值的单元就会被粗化或做粗化标记；而带 Min Allowed 以上的 y^+ 或 y^* 值的单元就会被细化或做细化标记；

注意如果你正进行 hanging node 自适应（默认），你就不能创建一个比初始单元更粗的单元。如果这样，那你就必须采用 conformal 自适应。也要注意 conformal 粗化只适用于二维或轴对称几何体。详细请看 23.10 部分。

4）可选）如果你想设定任何自适应选项（在 23.10 中有叙述），点击 Controls... 按钮打开 Grid Adaption Controls面板。

5）在自适应寄存器中设置（它是可操作的，在 23.9 部分中有描述），点击 Mark 来对要自适应的单元做自适应（细化/粗化），或者点击 Adapt 来实现立即细化。

（如果你想取消细化/粗化，或者取消做细化或粗化标识，那么可在做标识或自适应前

关掉Refine 或 Coarsen选项）

23.9 管理自适应寄存器

你能操作，删除和显示通过对网格自适应做标记创建的自适应寄存器。由于在网格自适应时会用到这些寄存器，所以你操作这些寄存器同时还给你提供了一些自适应过程之外的控制。

在Manage Adaption Registers面板（见图 23.9.1）上实现对自适应寄存器的管理。

Adapt ⟶Manage...

（你也可以在任何一个自适应面板上通过点击 Manage... 按钮来打开这个面板）

更多关于寄存器的信息，请参考 23.2.1

综述

一般激活复合自适应函数的创建目的是想限制自适应在一个特定区域（用 masks）并且/或者创建一个更准确的误差指针。FLUENT 提供几个工具以帮助创建复合自适应函数。首先，你能用几何与/或计算矢量信息创建初始自适应寄存器，你创建了自适应寄存器之后，你能操作这些寄存器和与他们相关连的细化和粗化 masks。通过改变类型和/或结合他们来创建想要的复合函数来操作寄存器。通过使用 Exchange, Invert, Limit, 和 Fill 操作来操作 Masks。最后，你能删除，显示，和更重要的是采用复合自适应函数。

例如，你能捕捉在一个超音速流场中的楔形体上产生的已经完成了对压力梯度网格自适应的冲击尾流。然而，在近楔形体表面的压力梯度相对来说是小的。因此你可以采用速度场来解决同样重要的近楔形体表面的边界层问题。如果你对压力自适应，近表面的区域可能会被粗化。如果你随后对速度自适应，这些同样的区域可能就会被细化。但是这最后的解将不会什么得到实在的好处。但是，如果你综合速度和压力梯度自适应函数，这新的自适应函数将会在两个区域都将增加解。是通过你对每个流场变量的确定的细化和粗化域值来决定在复合函数中两个函数的相对权重。另外，如果你决定细化只在靠近楔形体前端的冲击流和边界层，那你可在楔形体前端的边用区域自适应函数，改变新的寄存器为 mask，并且与复合梯度函数结合来创建一个圆形区域。

23.9.1 操作自适应寄存器

修改，操作自适应寄存器的三个工具是：改变类型，综合，与删除。

改变寄存器类型

目前，有两类寄存器：自适应寄存器和选择（mask）寄存器。通过 GUI 和文本界面产生自适应寄存器(也就是说是派标记细化或粗化的单元的寄存器)中得到提出的自适应函数。然而，这些寄存器通过改变他们的类型可转变为选择寄存器。选择寄存器，不象自适应寄存器，它只能保持两个状态：激活和非激活。如果自适应寄存器被转化为选择寄存器，标记为细化的单元为激活，所有另外的单元是非激活；也就是说，忽视了标识为粗化的单元。通常，转化为选择寄存器的自适应寄存器是通过专门标注为细化单元的自适应函数来生成的。自适应寄存器与选择寄存器之间的另外一个主要的不同就是在于他们的结合方式。

下面列出了改变一个或多个从自适应转为 mask 的寄存器的类型步骤，反之亦然。

1） 在 Registers list中选择寄存器。

2） 在 Register Actions 下点击 Change Type 按钮。

这新的寄存器（或者最近选择或删除寄存器，如果选择了复合寄存器。）就会出现在 Type under Register Info。你能查看选择的每个寄存器的类型是什么。

复合寄存器

在创建了单个自适应寄存器和适当修改之后，结合这些寄存器就可以常见复合自适应寄存器。任何寄存器个数可以用下面的复合：

1） 所有自适应寄存器被合并成一个新的自适应寄存器

2） 所有选择寄存器被合并成一个新的选择寄存器

3） 合并新的自适应寄存器和选择寄存器

任何寄存器数目可用下面的方式合并：

1） 如果在任何一个寄存器中的单元被标记为细化，在新的寄存器中标记为细化（用逐位 OR）。

2） 如果在任何一个寄存器中的单元被标记为粗化，在新的寄存器中标记为粗化（用逐位 AND）。

合并选择寄存器可用一种类似于细化标识：如果任何一个单元标记为激活，那在新寄存器中的单元也被标记为激活（用逐位 OR）

最后，在合并一个自适应寄存器和一个选择寄存器中，只有在选择寄存器中有标记的单元在复合寄存器中才能有自适应标记。

例如，基于压力梯度创建的一个自适应函数在整个求解体中可以生成标记为细化或粗化的单元。如果这寄存器跟从球体内部的标记单元创建的一个选择寄存器合并，那么，在新的寄存器中，只有球体内部的单元才能被标记为细化或粗化。

Mssks 的效果依赖于他们被应用的顺序。例如，考虑两个相邻的，循环 mask。应用一个 mask 到这自适应寄存器中，然后应用另外一个 mask 到第一复合的寄存器的结果将是一个更加不同的寄存器(跟应用两个 masks 的复合寄存器到初始自适应寄存器将给一个很不同的结果相比)。

1） 在 Registers list 中，选择寄存器。

2） 在 Register Actions 下，点击 Combine 按钮。

选择了的寄存器将维持原样，并且从合并所得到的寄存器就会被加到 Registers list 中。在有些情况下，可以创建三种新的寄存器：自适应寄存器的复合寄存器，选择寄存器的复合寄存器，还有是两个复合寄存器的复合体。

从更多的关于寄存器的信息，可参考 23.2.1 部分。

删除寄存器

任何数目的自适应寄存器都可以被删除。删除寄存器的基本原因是要抛弃不想要的自适应寄存器，以减少可能的干扰和潜在由这些选择了的不想要的寄存器生成不想要的结果。另外，同一个时间只能同时存在 32 个自适应寄存器。因此你可以抛弃那些不想要的寄存器来给新的寄存器腾出空间。

为了永久地删除一个或更多的寄存器，要进行以下步骤：

1） 在 Registers list 中选择寄存器

2）在Register Actions下点击Delete按钮。

23.9.2 修改自适应标识

自适应标识是用来识别一个单元是否应该细化，粗化，或既不细化也不粗化。目前，修改自适应标识有四个工具：Exchange，Invert，Limit和Fill操作。

Exchange操作把所有标识细化的单元改变成粗化标记而所有粗化标识初始单元改变成细化标识。通常，这操作只用在只有细化标识的自适应寄存器。例如，Exchange操作能用来粗化一个矩形区域。首先，你创建一个有细化标识单元的矩形区域的自适应寄存器。接下来，你用Exchange操作来修改单元标记，创建一个带粗化标识单元的矩形区域。

Invert操作只能用在选择寄存器中。它是与选择标记分不开的：标识为激活的单元被转化成非激活状态，而标识为非激活状态的单元被转化为激活状态。例如，如果你生成一个定义一个圆形区域的 mask，你就能用Invert操作快速地修改这 mask 来定义圆形之外的区域。

Limit操作应用存在的自适应体积来限制被选择的自适应寄存器。(更多关于自适应限制方面的信息可参考 23.10 部分)。同样，你可用这操作来决定在自适应过程中的Limit的效果。你能通过对只调整大单元设置Limit用体积限制来创建一个更均匀网格。当所有的单元都达到均匀尺寸之后，你能对想要的计算继续细化过程。

最后，Fill操作是在不是做细化标识的自适应寄存器中标识所有粗化单元。如果你把多个寄存器合并成一个新的寄存器，那么你就想用Fill操作。当你合并寄存器时，一个在所有的寄存器中是标记为粗化的单元就会被做粗化标记。如果你创建带一个只做细化标识的操作一个自适应寄存器，但是你又不想禁止粗化，那么在该寄存器与另外任何一个寄存器合并之前，你应该用Fill操作。

修改自适应标识的步骤如下：

1）在Registers list.中选择寄存器

2）在Mark Actions下点击Exchange, Invert, Limit, 或Fill按钮。

23.9.3 显示寄存器

在创建复合自适应函数的过程中，查看单元标识通常是很有用的。你能在单元质心和/或一个单元内画一个标记来查看这单元的状态。默认情况下，有细化标识的单元被染成红色，并且粗化标识的单元就被染成青色。另外，在一个选择寄存器中标识为激活状态的单元也被染成红色。有些单元被标识为自适应，但是从网格格子最终增加或减去的单元数目是由自适应限制和网格格子特性决定的。

显示寄存器的步骤如下：

1） 在 Registers list 中选择寄存器

2） 如果你想，你可以通过点击 Options... 选项，设置任何一个显示选项。

3） 点击 Display 按钮。

自适应显示选项

自适应寄存器显示的多个方面都可以被修改，比如线框的可见性和隐藏性，标识器的可见性，颜色，尺寸和标记，并且显示时表面和区域网格是否被抽掉等。

自适应寄存器的显示能力允许你查看标记了自适应的单元。根据你问题的维数和标记单元的数目，你可以制定自适应显示选项。例如，查看标记二维单元的一个通常的办法是拉长网格并且填充线框，但是在三维情况下，这是不切实际的。在三维情况下，你可以画带选择了的边界层的网格的单元的质心标识器。

在一个自适应或选择寄存器中你能用标识符和/或线框显示标记单元。标识符是一个放置在单元质心的标志。标识符也分为细化标识符和粗化标识符。你能改变这符合，颜色和标记符的尺寸大小。一个线框是由三角形或四边形的边组成。它的颜色是跟单个标识符颜色是相同的。并且如果你想的话，它还可以被填充。

最后，为了帮助确定标记单元的位置，用标记符标志或线框来抽掉（can be drawn）格子的一部分。

在 Adaption Display Options panel 面板上（图 23.9.2）可以设置所有这些选项。

Adapt ⟶ Display Options...

（你可以在 Manage Adaption Registers 面板上通过点击 Options... 按钮来打开这面板）。

1） 为了激活或不激活标记细化/粗化单元线框显示，在 Refine 和/或 Coarsen 下，打开或关闭 Wireframe 选项。为了画填充线框（也就是说用一个实颜色，而不是轮廓颜色），要关掉 Filled 选项。

2） 为了激活或不激活标记细化/粗化单元线框显示， 在 Refine 和/或 Coarsen 下，打开或关闭 Marker 选项。如果你用标识符，你能在 Size field 中确定他们尺寸大小，并且在 Symbol drop-down 列表中确定他们的标志符。

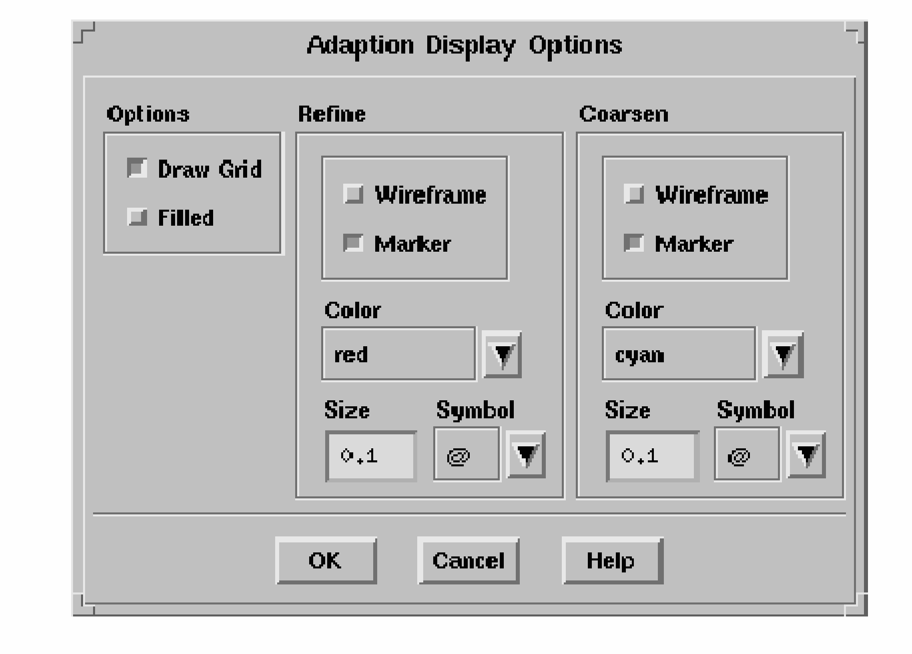


图 23.9.2 The Adaption Display Options 面板

3） 为了改变细化或粗化标识符或线框的颜色，在 Color drop-down 下拉菜单中选择细化或粗化的新颜色。默认情况下，细化，而粗化的标记符/线框是青色的。

4） 为了在寄存器显示中包括网格部分，选 Draw Grid 选项。在 Grid Display 面板上将会自动出现，并且你可以在那儿设置网格显示参数。当你在 Manage Adaption Registers 面板上点击 Display 按钮，在 Grid Display 面板上定义的网格显示，就会包括在自适应显示里面了。

23.9.4 寄存器自适应

基本的目的是改善网格以有效地提高计算的效率。这些寄存器工具为你提供了创建用于流场应用中的复合自适应函数的功能。最后，制定好的自适应函数可用来直接细化或粗化网格。

进行自适应的步骤如下：

1） 在 Registers list 中选择寄存器

2） 点击 Adapt 按钮

23.10 网格自适应的控制

FLUENT 允许你改变从 hanging node 到 conformal 的自适应类型或者能够设置单元区域，能被自适应的单元尺寸和在自适应过程中被生成的单元总数目的限制。你也能修改在梯度函数中的体积权重的强度，和限制细化和/或粗化自适应过程，并且控制哪个节点在 conformal 粗化期间符合从网格中能被删除的要求。

所有控制自适应方面的参数都可在 Grid Adaption Controls 面板（见图 23.10.1）上设

置。

Adapt ⟶ Controls...



图 23.10.1 Grid Adaption Controls 面板

（你也可以在任何一个自适应面板上点击 Controls... 按钮来打开这个面板）

！这里强烈建议你在开始自适应过程前要写 case 和 data 文件。然后，如果你生成了不想要的网格，你可以用保存的文件重新进行这过程。

控制自适应的类型

你可以选择使用 hanging node 或 conformal 自适应。你也能将自适应过程限制在通过细化增加计算网格和/或通过粗化减少网格密度。

1）要使用 hanging node 自适应（默认），那在 Type 框中选择 Hanging；如果要用 conformal 自适应，那就选 Conformal. 。在 23.2 部分中讲述这两种类型的自适应过程。

2）如果要使细化能用或不能用，那就打开或关闭 Refine 选项。

3）如果要使粗化能用或不能用，那就打开或关闭 Coarsen 选项。

限制自适应在区域内

你能限制自适应过程在规定的单元区域内。网格单元组成的流体和固体区域通常有很大不同的计算要求和误差指针。通过限制自适应在一规定的单元区域，你就能用不同的自适应函数来创建优化的网格。

为限制自适应在一个特定的单元区域（近一个特定的单元区域），选择 在 Zones list 中现在你想要进行的自适应的单元区域。默认情况下，自适应是会在所有单元区域进行。

用单元体积或体积权重来限制自适应

最小单元体积限定在细化过程只限制在体积大于限定值的单元。你可对大单元用这种细化过程，逐渐减小限定值从而创建一个均匀的单元尺寸分布。在Min Cell Volume field中可设置限定值。

限定单元总数目

单元总数目最大值是一个约束，以便防止 FLUENT 生成比你分析问题所需要的更多的网格单元。另外，这还节约了你在等待创建这些网格的网格自适应过程的完成的时间。否则如果你的计算机内存有限，那就会浪费你大量的时间。然而，根据单元访问的顺序，太早结束细化过程会产生满足质量的网格。单元在内存中的排列布置决定着访问顺序，但在内存中的排列一般情况下是随机的。

在Max #of Cells field中你能设置总网格单元数目。默认值 0 表示在单元数目上没有限制。

在 conformal 粗化的过程中控制节点的删除

通过修改节点的删除标记，你在粗化过程中可以控制节点的删除。节点的删除标记控制着哪些节点是能从网格中删除的。（节点删除标记只能应用在 conformal 自适应方法中，对 hanging node 自适应方法，在粗化过程中只有细化节点能被删除，而且是永久删除。）

细化中引入的细化节点和细化前就在网格中的节点叫做初始节点。FLUENT 保留带节点标记的一部分在 case 文件中。如果这部分不存在（也就是说当你首次读这网格），那它就认为所有的节点是初始节点。另外，它还能区别开在边界上，内部和两者的周期区域初始节点与自适应细化创建的节点。

为了确保维持初始形状整区域的边界的初始形状，通常只有通过细化而引入的节点被删除。例如，考虑一个矩形区域的网格。如果在矩形边上的其中一个节点没有给修改，但是如果矩形角上的一个节点被忽略，那么这形状就会从四边形改变为五边形。

然而，你能通过改变这节点的删除标志来修改这默认行为。这最常见的修改法会允许你删除初始内部节点。删除内部节点不会破坏边界的形状。实际上，如果初始网格在一个物理特征上微小或没变化的区域上有真实解，那么这一点可能是很有用的。

！如上所提，删除初始边界或周期性节点能改变形状，并且在一些例子中甚至会破坏布局，产生无用的网格。因此，当删除初始边界和周期性节点时要进行最后的离散。一直都主张你在开始自适应过程前写一个 case 和 data 文件。然后，如果你生成不想要的网格，你能通过保存的文件重新开始这过程。

默认情况下，只有允许删除细化节点。默认情况即为在Grid Adaption Controls面板上激活Boundary - Refined，Internal - Refined和Periodic - Refined状态并不激活Boundary - Original，Internal Original和Periodic - Original状态。如果你想不激活这些类型节点的删除，那你可通过关掉相关检查按钮来实现。同样，如果你想激活他们删除，那就打开相关检查按钮。

23.11 通过光顺化与交换来完善网格

光顺化与面交换是实现网格自适应的工具，它们通常是用来增加最后网格的质量。光顺化是重新配置节点并且面交换修改单元连通性以实现网格品质的改善。

！面交换只能用于三角形网格或四面体网格。

在Smooth/Swap Grid 面板（见图 23.11.1）上可实现光顺化与交换。

Adapt → Smooth/Swap...

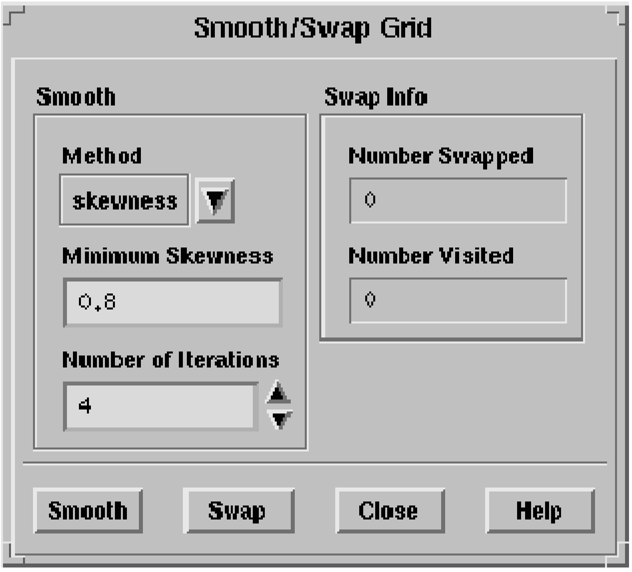


图 23.11.1 Smooth/Swap Grid面板

23.11.1 光顺化

在 FLUENT 中有两种光顺化方法：Laplace 光顺化和基于偏斜度光顺化。前者可用在任何类型网格，但是第二种方法只能用于三角形/四面体网格。

！ 对三角形和四面体网格，建议你采用基于偏斜度光顺化方法；相反，Laplace 方法只能用于四边形和六面体网格。

Laplacian 光顺化

当你用 Laplacian 光顺化时，一个 Laplacian 光顺化操作就会对非结构化网格进行重布置节点。这新节点位置是该节点与相邻节点的平均位置。松弛因子（一个在 0.0 和 1.0 之间的数值）乘以计算节点增量。一个 0 值就不会引起节点的移动，并且一个平均值会引起等于整个计算增量的移动。图 23.11.2 介绍了对一个典型的四边形单元 Laplacian 光顺化生成的新节点的位置。

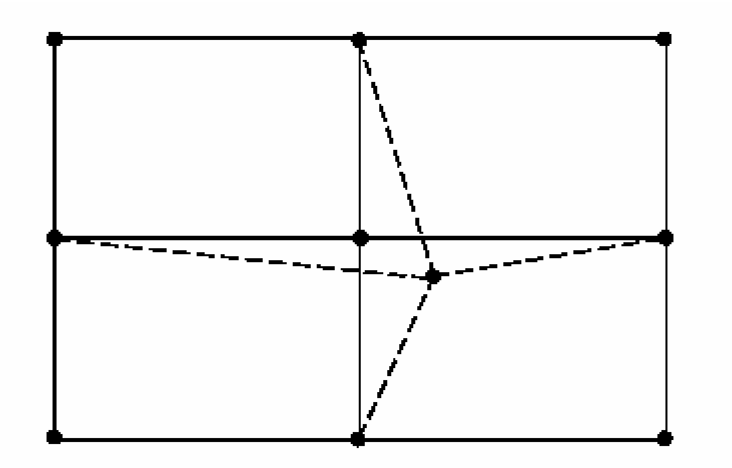


图 23.11.2　在一个节点位置的光顺化操作结果
（虚线是初始网格，实线是后来网格）

这个重布置策略能改善网格偏斜度，但是通常分散了原来聚集的节点。在极端的例子中，这个操作可创建网格线通过边界，创建负单元体积。这情况最可能出现在陡峭或粗糙地突然凸起拐角的地方，特别是如果你进行带一个大的松弛因子进行多次光顺化操作的时候。图 23.11.3 说明了进行一次松弛光顺化迭代创建相互交错的网格线之前的一个初始四面体网格（见图 23.11.4）。

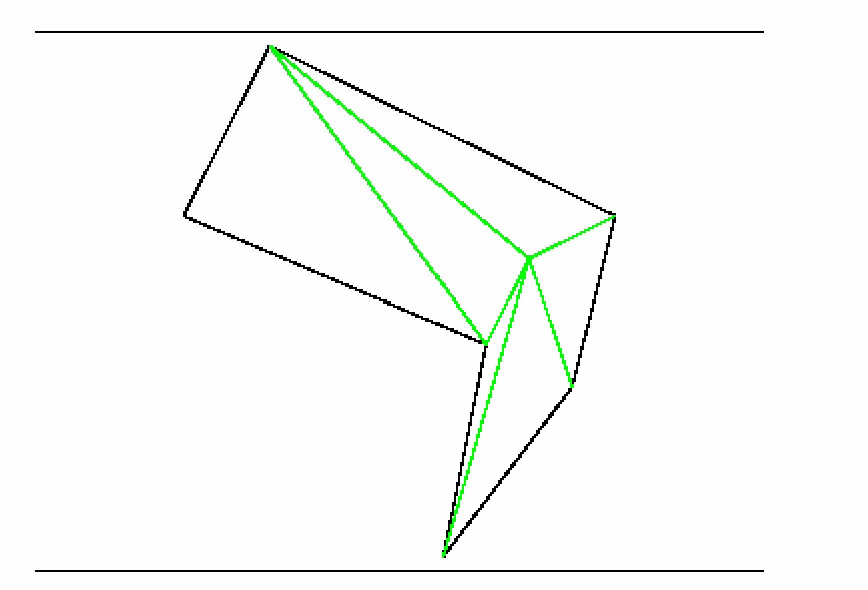


图 23.11.3　光顺化操作之前的初始网格

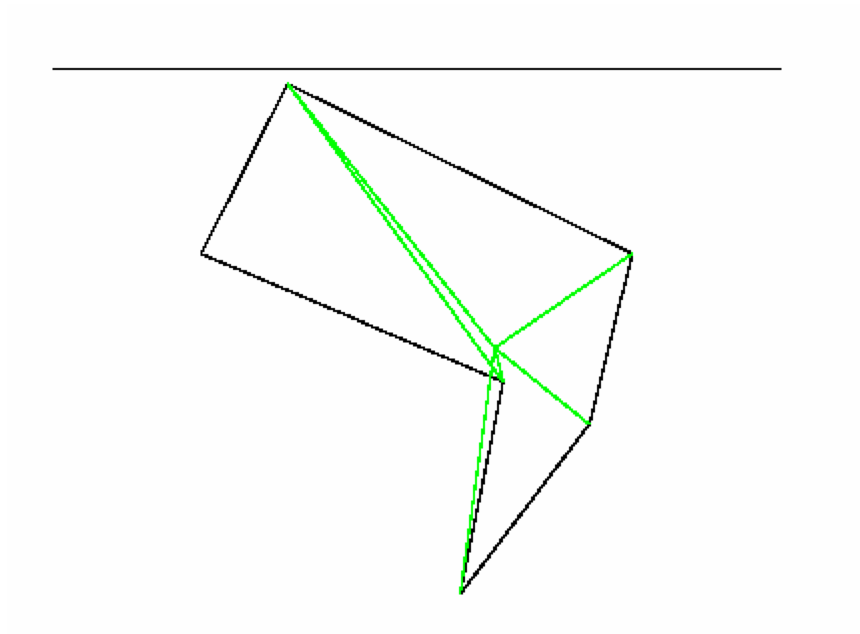


图 23.11.4　　网格光顺化能产生交错网格线

默认的光顺化参数设置应该是在最小不利影响下改善网格品质。但是你应该小心在光顺化之前一定要保存 case 文件。在二维中，如果你用了一个保守的松弛因子并且初始网格品质好，那光顺化中常见的不利会是非常的少。然而，在三维情况下，网格拓扑腐化（corruption）更常见。特别是对四面体网格。对于三角形和四面体，这里推荐采用基于偏斜度的光顺化处理方法。

光顺化操作可多次重复应用，但是当光顺交换次数增多，节点有从边界往外拉的现象并且网格会失去任何聚集特征。

Laplacian 光顺化的步骤

如果要进行 Laplacian 光顺化，你要按照下面步骤：

1）在 Smooth/Swap Grid 面板上（见图 23.11.1），在 Smooth 下的 Method 下拉菜单中选择 laplace 选项。

2）在 Relaxation Factor 框中设置一个乘以节点的计算位置增量的因子。这因子于小，那么节点的移动就更小。

3）在 Number of Iterations 框中确定网格要进行连续光顺交换的次数。默认值是为 4。

4）点击 Smooth 按钮。

基于偏斜度的光顺化方法

当你用基于偏斜度的光顺化方法时，FLUENT 对网格进行一次重新布置内部节点来减少网格的最大偏斜度的光顺化操作。FLUENT 将尽量移动内部节点以改善偏斜度大于规定的最大（minimum？？）偏斜度的单元的偏斜度。这过程可能很耗时间，因此你应该只对高

偏斜度的单元进行光顺化。经过几次光顺化后就能得到完善网格。如果移动某网格会增加这最大偏斜度的话，那内部检查就可避免这节点被删除。但是当一个高偏斜度的单元被改善之后，通常会引起一些单元的偏斜度增加。这样，你可能见到最大偏斜度被减小的同时平均偏斜度并没有增加的情况。

！你应该仔细考虑，由于减少最大偏斜度要付出潜在增加平均偏斜度代价的改善网格是否值得的问题。只对高偏斜度单元进行光顺化（比如 0.8 或 0.9）可能减少在平均偏斜度方面的不利影响。

！基于偏斜度的光顺化方法只适用于三角形和四面体网格。

基于偏斜度的光顺化方法的步骤：

进行基于偏斜度的光顺化，你要按照下面步骤：

1）在 Smooth/Swap Grid 面板上（见图 23.11.1），在 Smooth 下的 Method 下拉菜单中选择 skewness 选项。

2）在 Minimum Skewness 框中，选择要进行节点光顺化的最小单元的偏斜度。FLUENT 将移动内部节点以改善偏斜度大于这值的单元的偏斜度。默认情况下，Minimum Skewness 是设定为二维是 0.4，三维是 0.8。

3）在 Number of Iterations 框中确定网格要进行连续光顺交换的次数。默认值是为 4。

4）点击 Smooth 按钮。

基于偏斜度的光顺化方法可跟面交换法替换使用。（见 23.11.3 部分）

23.11.2 面交换法

面交换法可改善三角形和四面体网格品质。

三角形网格

对三角形网格，这方法是用 Delaunay 圆测试可决定是否两三角形共有边应该交换。如果一个单元的外接圆没有包容第二单元的非共有节点，那么这两个有公共边的单元满足圆测试。图 23.11.5 介绍了相邻单元满足和不满足圆测试。在不满足圆测试时，三角形或面被交换。如图 23.11.6 所示。

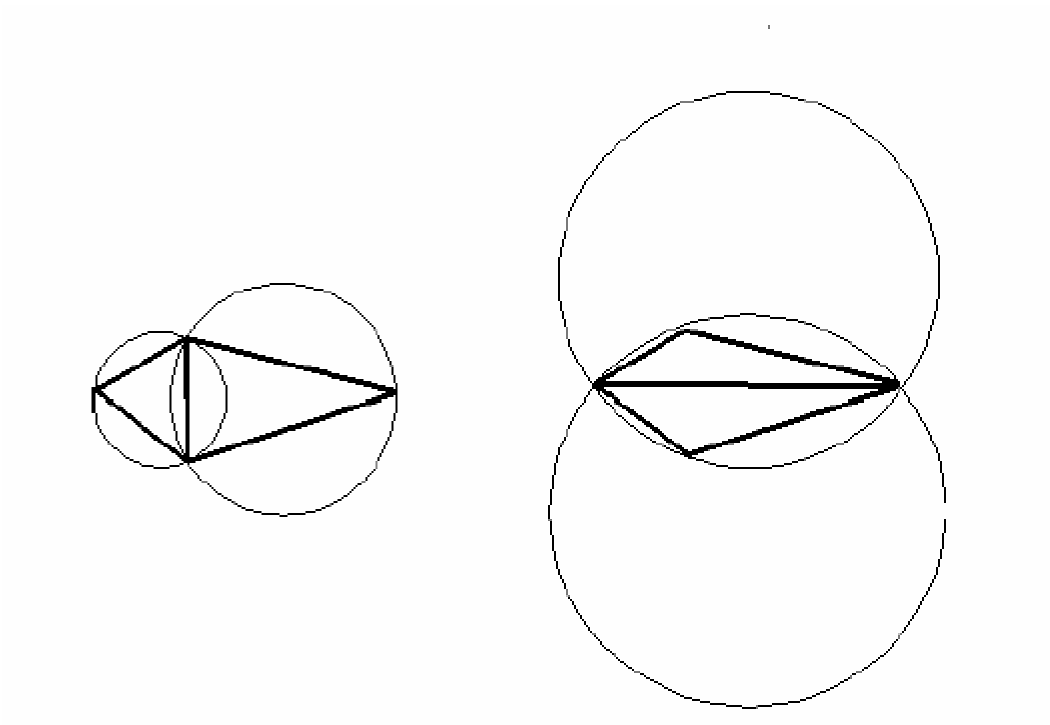


图 23.11.5　满足和不满足圆测试的单元结构例子

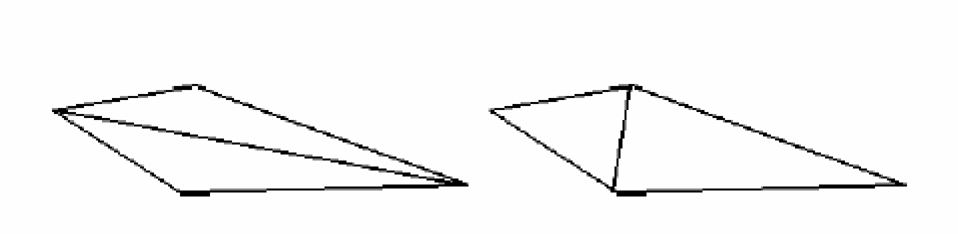


图 23.11.6　为满足 Delaunay 圆测试的面交换

重复应用面交换技术能生成强制Delaunay网格。如果一个格子是Delaunay格子。那它是网格中最小角最大的一个独特的三角形。因此，这三角形接近于等边三角形，为给定的节点分布提供最接近等边的网格。(关于Delaunay网格生成的更多信息可看TGrid用户指南中的理论章节。)

四面体网格

对四面体网格，面交换包括搜索三个有公共边的单元并转化成两个有公共面的单元以减少偏斜度和单元数目。(见图 23.11.7)

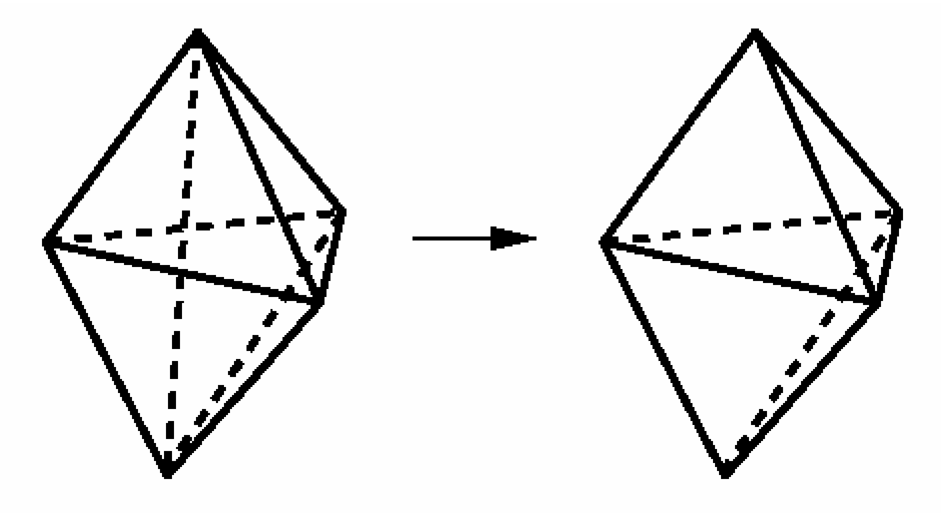


图 23.11.7　三维面交换

面交换的步骤

要进行面交换，可简单地点击 Swap 按钮直到 Number Swapped 为 0 为止。Number Visited 表示访问过的并且经过测试能否进行面交换的总的面的数目。

23.11.3 结合基于偏斜度光顺化和面交换

正如 23.11.1 部分中所提，基于偏斜度的光顺化通常应该用面交换替换。下面给出了这个过程一些指导：

1） 用三维是 0.8，二维是 0.4 的 Minimum Skewness 进行四次光顺化迭代。

2） 交换直到 Number Swapped 减少到 0。

3） 对三维网格，让 Number Swapped 减少到 0.6 并重复光顺化/交换过程。

图形及可视化
FLUENT 提供的图形工具可以使你很方便的处理 CFD 求解结果中包含的信息并观察相应的结果。下面的章节将向您介绍如何使用这些工具来观察您的计算结果。
（注意这个过程对于显示制图法的硬拷贝文件的存储是在 Saving Hardcopy Files 中描述的。）

基本图形生成
自定义图形显示
控制鼠标按键函数
修改视图

场景的生成
动画
视频生成
柱状图与 XY 散点图

基本图形生成

在 FLUENT 中生成图形来显示网格, 等高线,轮廓, 速度矢量, 和 迹线. 下面将介绍如何产生这些图形。(柱状图与 XY 散点图的生成将在柱状图与 XY 散点图这一节进行介绍)。

1　如果您的模型包含了不连续相，您可在轨道的图形显示这一节找到相关的粒子轨道的图形显示方法。
网格的显示
等高线 和轮廓的绘制

速度向量的绘制
轨迹的显示

网格的显示

在问题的一开始或检查求解结果时，您肯定希望能够观察某些特定表面上的网格划分情况。如图 1 所示，你可以显示求解对象的部分和全部轮廓；如图 2 所示，绘制网格线（边）；如图 3 所示，对一个三维求解对象，绘制充满了网格的实体表面；或如图 4，绘制求解对象表面上的节点。

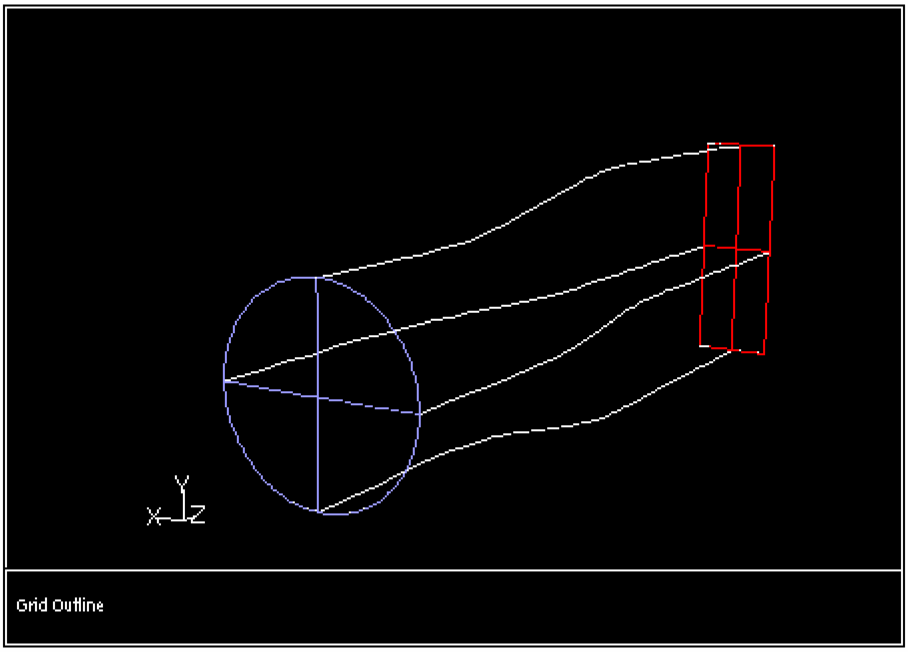


图 1：显示轮廓

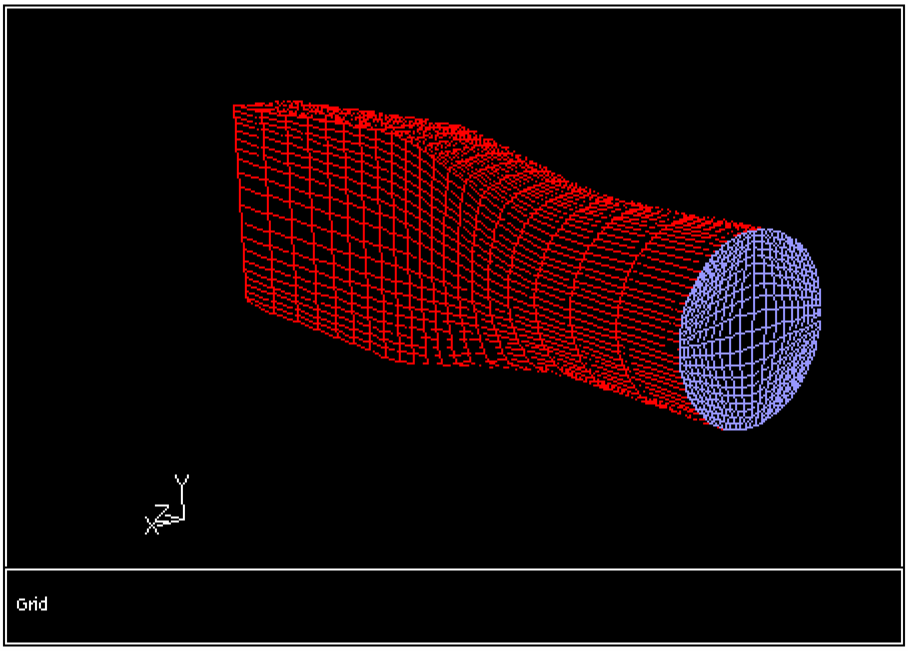


图 2：网格线的显示

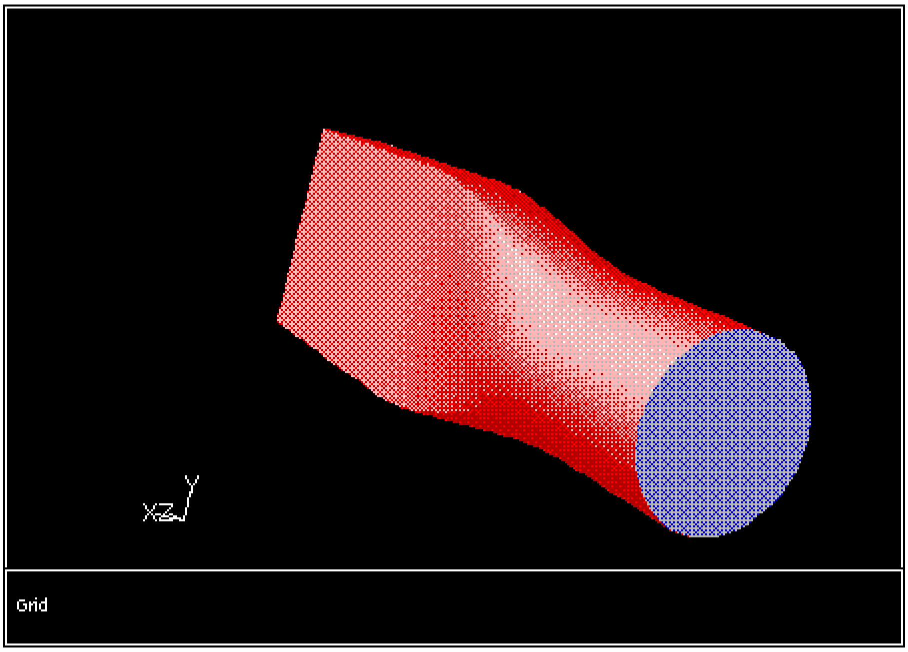


Figure 3: 网格面（网格填充）显示

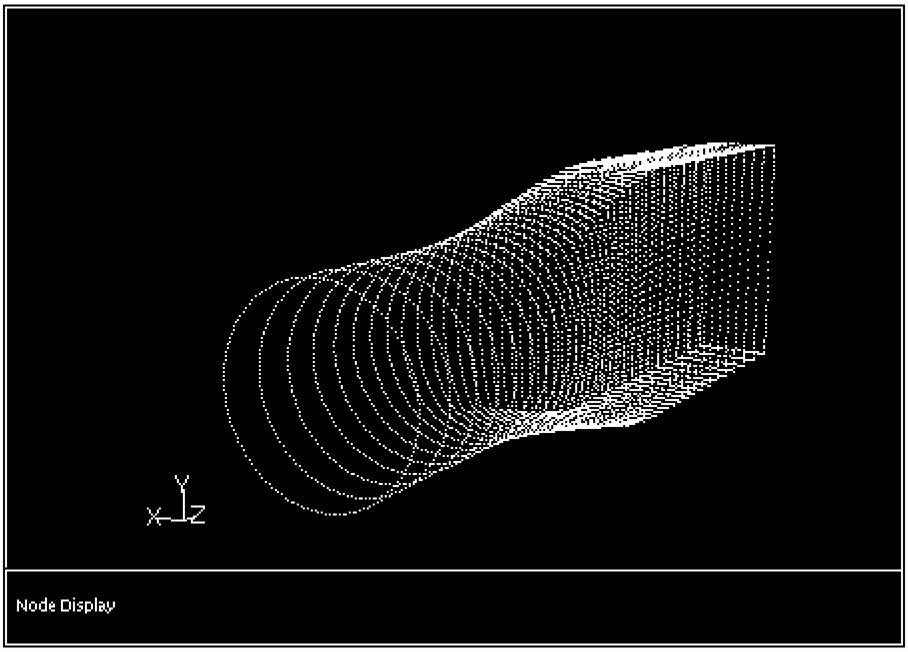


Figure 4: 网格节点显示

生成网格或轮廓线视图的步骤
网格和轮廓线视图选项

生成网格或轮廓线视图的步骤
您可以通过网格显示对话框来绘制求解对象的部分或全部网格或轮廓线。（如图 1）
.

Display ?Grid...

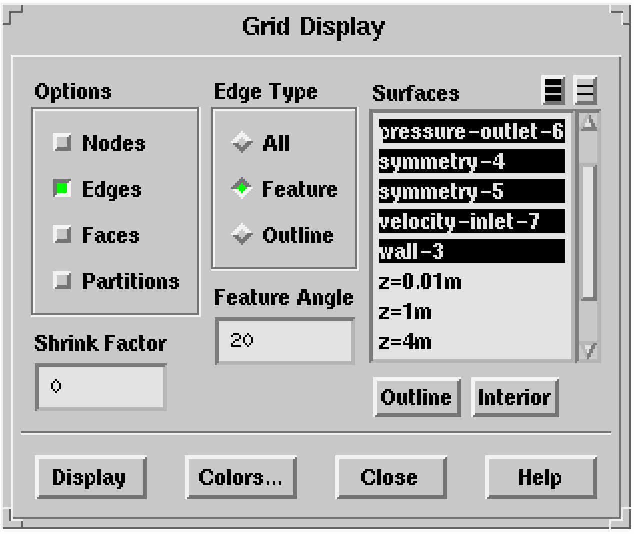


图 1: 网格显示对话框

生成网格或轮廓线的基本步骤如下：

1. 在表面列表中选取您需要显示的网格或轮廓线的表面。点击表面列表下的 Outline 按钮来选择所有“外”表面。如果所有的外表面都已经处于选中状态，单击该按钮将使所有外表面处于未选中的状态。点击表面列表下的 Interior 按钮来选择所有“内”表面。如果所有的内表面都已经处于选中状态，单击该按钮将使所有内表面处于未选中的状态。

2. 根据您需要显示的内容，根据下列步骤有选择的进行：
? 显示所选表面的轮廓线，在图 1 所示的对话框中进行如下设置：在 Options 选择 Edges，在 Edge Type 中选择 Outline。如果您需要更详细的关于显示一个复杂表面的轮廓线的设置，请参考网格和轮廓线显示选项。

?显示网格线 (如图 2), 在 Options 选择 Edges，在 Edge Type 中选择 ALL。

?绘制一个网格填充图形 (如图 3), 在 Options 选择 Faces。

?显示选中面的网格节点 (如图 4), 在 Options 选择 Nodes。

3. 设置网格和轮廓线显示中的其它选项。

4. 单击 Display 按钮就可以在激活的图形窗口中绘制指定的网格和轮廓线。

如果您选择了网格填充图形, 并且希望图形光滑，您应该打开光源，并选择一种光线插值方法而不是在光线对话框或显示选项对话框中对 Flat 进行设置。

如果您显示网格节点, 并希望通过指定符号来代替节点, 您可以通过在显示选项对话框中设置 Point Symbol 来实现。 详细资料参考修改渲染选项。

注意，对于具备周期性边界条件的求解问题， 您在求解对象的两侧均不能看到其边界。为了在网格的显示中包含周期性“阴影”边界，你可以使用 display/grid 命令。

网格和轮廓显示选项

这个选项在生成网格或轮廓线步骤的第三步中曾经提到过，它包含了修改网格颜色，为轮廓线显示增加轮廓线的重要特征，绘制分割边界，以及在显示中缩小面或单元。

FLUENT 允许您通过管理颜色对每一个区域类型或表面来显示具有不同颜色的网格。这个特性可以帮您迅速方便的理解网格绘制。如果需要修改颜色，点击网格显示对话框上的 Color 按钮来打开网格颜色对话框（图 1）

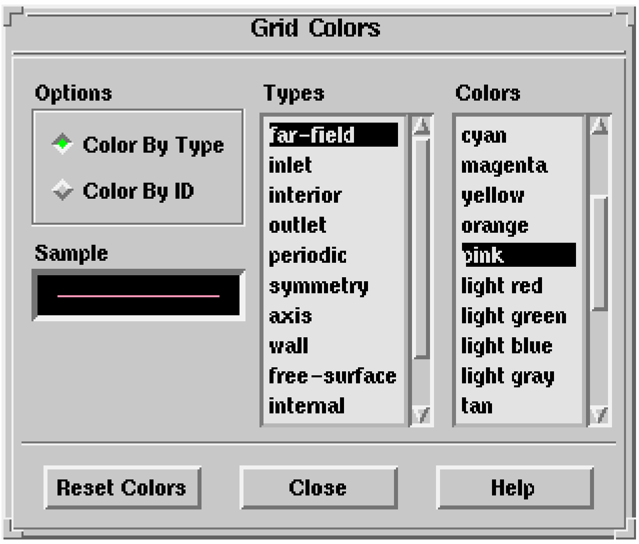


图 1：网格颜色对话框
（您可以通过场景描述对话框开为每一个需要显示网格的平面单独设置颜色）

如果要改变一个指定区域类型的网格的显示颜色， 从类型列表中选定区域类型并在颜色列表中选择新的颜色。 当你再次显示网格时，你会看到颜色改变后的效果。 注意 Types 列表中的表面类型适用于全部的表面网格（例如，使用 Surface menu 打开面板创造的表面的网格是画好的）除了表面区域。

对于封闭的 3D 物体如柱体， 标准轮廓线显示通常不能精确的显示其细节。 这是因为对于每一个边界， 只有这些在几何体外侧的边(例如一些在边界上只被一个表面使用的边) 才被显示。图 2 显示了一个复杂的管道的轮廓线， 只有入口和出口是可见的。

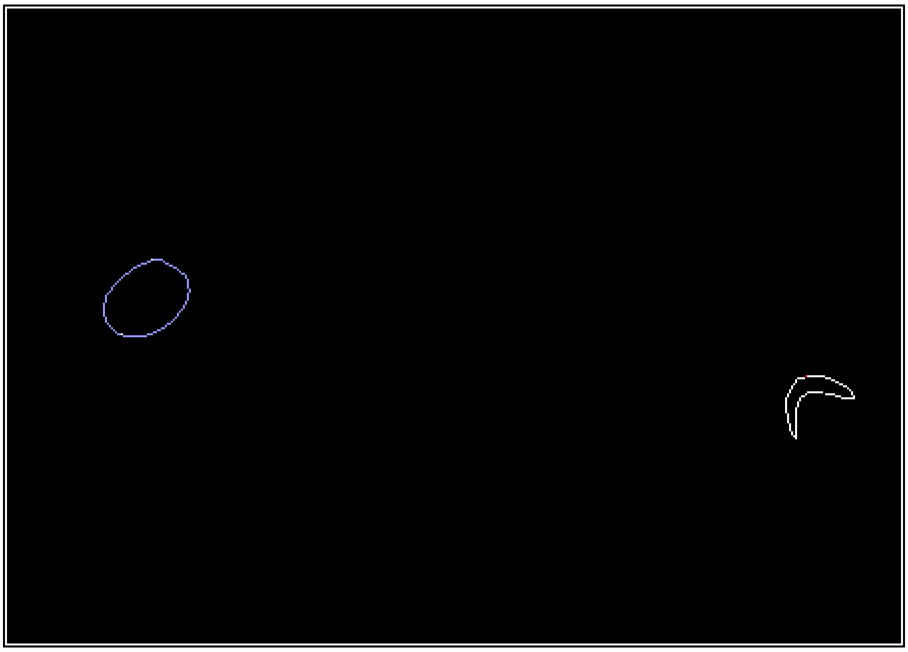


图 2: 复杂管道标准轮廓线

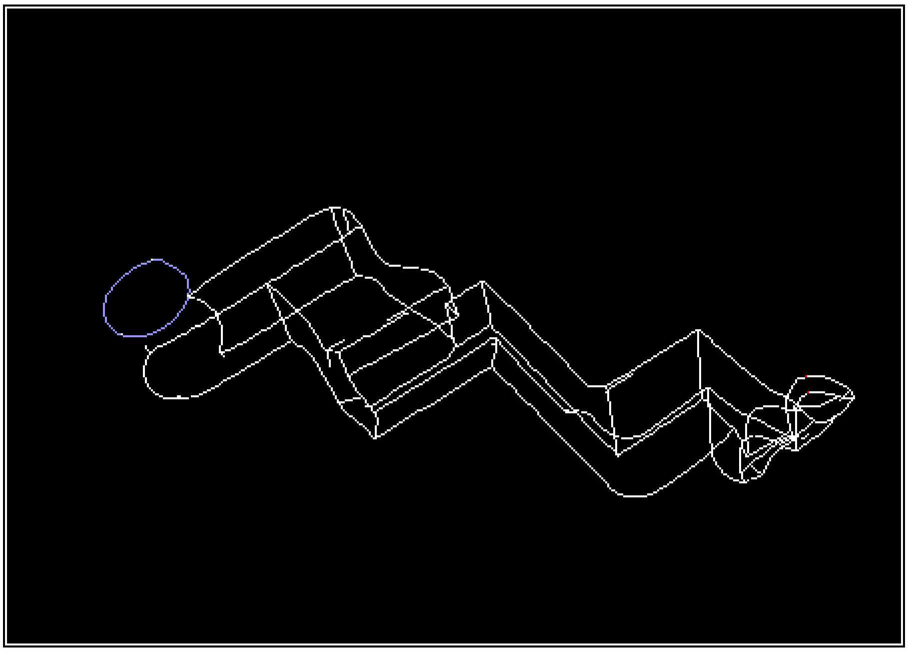


图 3:复杂管道特征轮廓线

你可以通过网格显示对话框中的特征选项得到额外的轮廓线特征（如图 3）。在 Edge Type 中选择 Feature 选项，然后设置特征角度。默认特征角度为 20 度， 如果两个邻接表面法向方向的夹角大于 20 度，那么在这两个面中的边将被绘制。 减小特征角度使得更多的边（细节）能够在轮廓线的绘制中显示出来。角度的大小取决与你的几何体的曲率和复杂度。你可以逐渐修改特征角度直到你得到一个满意的轮廓线显示为止。

如果你为了并行处理分隔了网格，你可以通过在网格显示对话框中选择 Partitions 选项将分隔的边界增加到网格显示中。

如果你需要在网格显示中区别个别的面或单元， 又或者你想扩大两个邻接面或单元间的距

离，你可以通过在网格显示对话框中增大 Shrink 系数实现。 采用默认值 0 会使得在显示中邻接的面或单元的边发生重叠。 而当值为 1 时，会出现极端相反的情况：: 每一个面或单元都被一个点代替，而其之间存在相当大的距离。 一个很小的值如 0.01 就可以将邻接的面或单元区分开来。 采用不同值的收缩系数显示效果如图 4，图 5 所示。在改变收缩系数后你必须点击 Display 按钮才能观察到其效果。

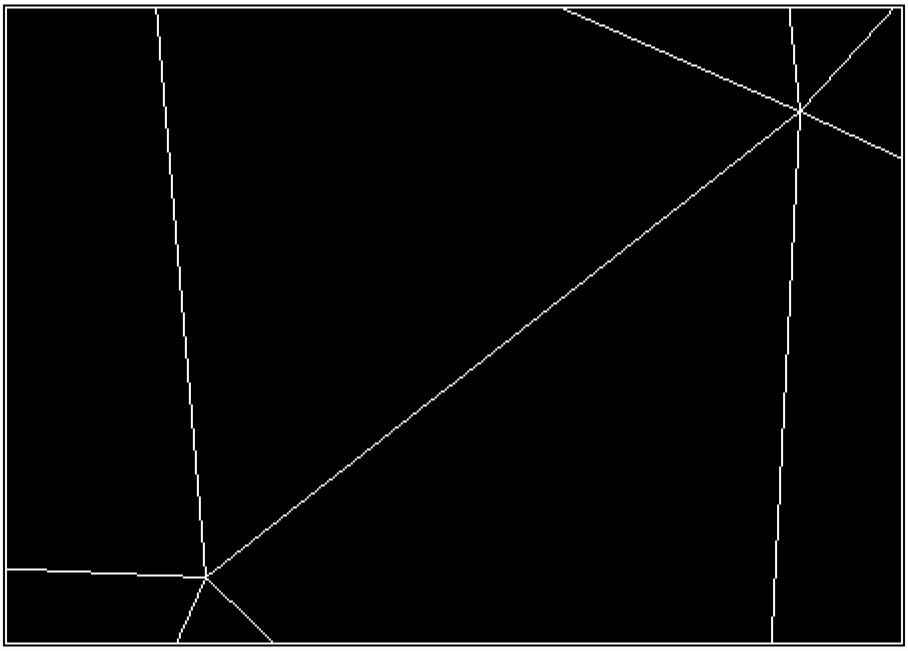


图 4: 收缩系数为 0 的网格显示

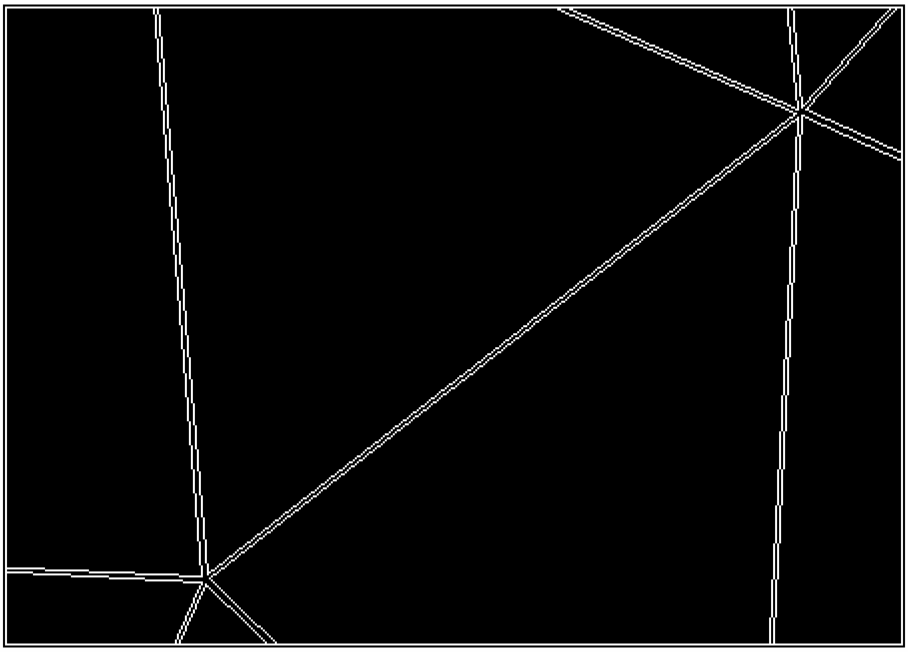


图 5: 收缩系数为 0.01 的网格显示

绘制等高线和轮廓

FLUENT 可以使你在求解对象上绘制等高线或外形的叠加。等高线是由某个选定变量（如等温线，等压线）为固定值的线所组成。而轮廓则是将等高线沿一个参考向量并按照一定比

例投影到某个面上形成的。图 1 图 2 显示了等高线和轮廓的例子。

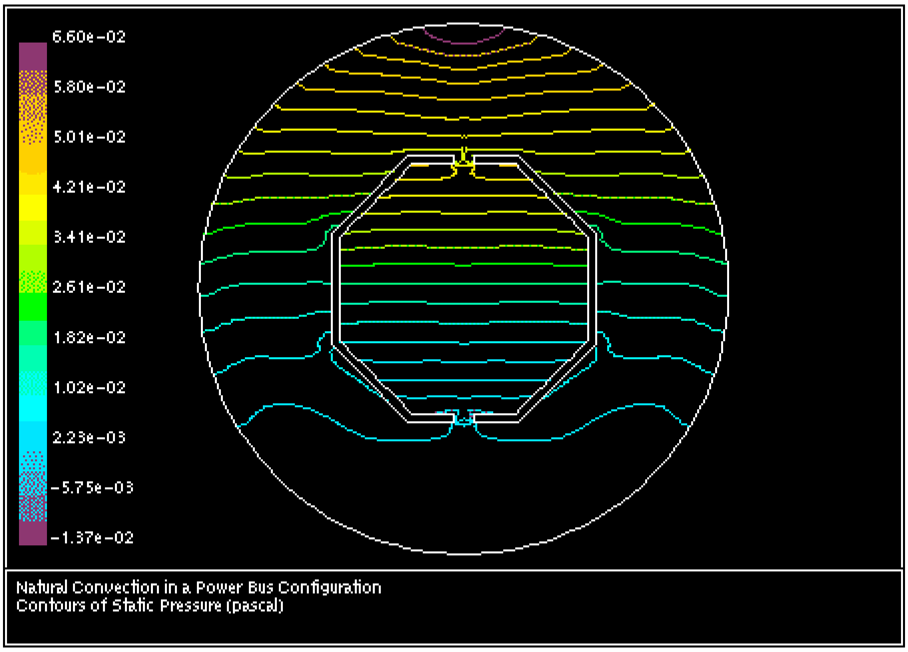


图 1: 静态压力等高线

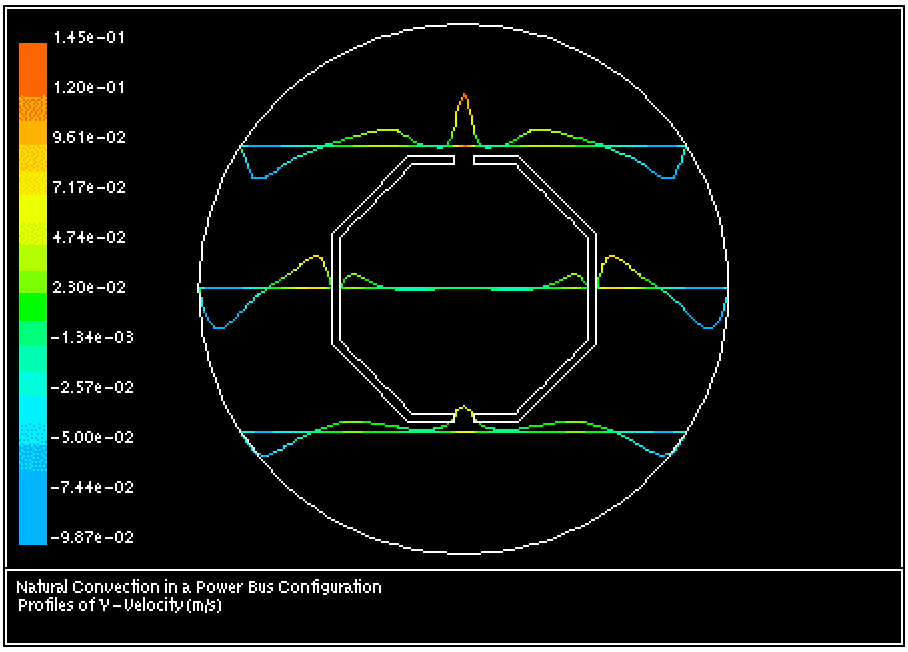


图 2:Y 向速度轮廓

生成等高线和轮廓的步骤
等高线和轮廓选项

生成等高线和轮廓的步骤

你可以通过图 1 所示的等高线对话框来生成等高线和轮廓。

Display ?Contours...

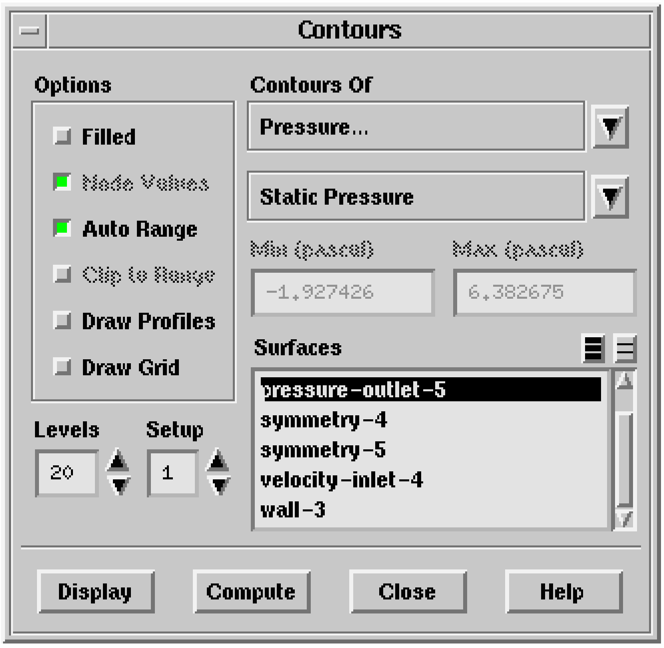


图 1： 等高线对话框

生成等高线或轮廓的基本步骤如下：

1． 在 Contours Of 下拉列表框中选择一个变量或函数作为绘制的对象。首先在上面的列表中选择相关分类；然后在下面的列表中选择相关量。（对列表中变量的解释可参考领域函数定义）

2．在 Surfaces 列表中选择待绘制等高线或轮廓的平面。对于 2D 情况，如果没有选取任何面，则会在整个求解对象上绘制等高线或轮廓。对于 3D 情况，你至少需要选择一个表面。

3．在 Levels 编辑框中指定轮廓或等高线的数目。最大数为 100。

4．如果你要生成一个轮廓视图，请在 Option 中选中 Draw Profiles 选项。在轮廓选项对话框中（如图 2），你可以如下定义轮廓：

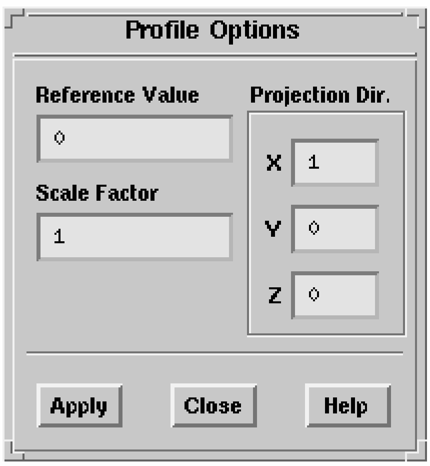


图 2: 轮廓选项对话框

1． 在 Reference Value 中为轮廓设置“0 高度”参考值，并在 Scale Factor 中设置投影的长度比例因子。在定义面上，任何值等于 Reference Value 中的数值的点都将被绘制在轮廓上。大于 Reference Value 中的数值的点将被投影到定义面的前面。(按照 Projection Dir 中定义的方向）并且根据 Scale Factor 中的值进行缩放；小于 Reference Value 中的数值的点将被投影到定义面的后面并进行缩放。

当你需要显示一个变量的变化，而这个变化量和这个变量的值相比较小，上述参数可以用来产生较全面的轮廓。例如，我们需要显示温度变化范围为 300K 到 310K 的温度轮廓。如果我们采用默认的比例系数（以绝对温度 310K 为基数）绘制温度轮廓，那么 10K 的变化在图中很难检测到。为了产生一个较完善的轮廓，可以将 Reference Value 设置为 300 并将设置 Scaling Factor 为 5 (只是举个例子) 来放大 10K 范围在轮廓上的显示效果。
在随后的轮廓显示中，当温度为 300K 时其位置将处于基准线上，而其它数据在显示时，首先将减去 300，并将其差值绘制在轮廓上。因而，轮廓上的图像只显示了相对于 300K 的温度变化。

2． 设置轮廓的投影方向(Projection Dir.)。如果是 2D 图形，例如，在求解对象上的压力等高线可以按 z 方向进行投影来形成一个地毯图（carpet plot），或者对 y 方向速度等高线沿 y 方向的切片进行投影形成一系列的速度轮廓图（例如图 2 的等高线和轮廓图）

3． 点击 Apply 按钮关闭轮廓选项对话框。

5． 设置等高线和轮廓选项对话框中的其它选项。

6． 点击 Display 按钮在激活的图形窗口中来绘制指定的等高线和轮廓。

显示的结果将包含选定变量的指定的等高线和轮廓的指定数目，同时并将其值量级的变化范围在最小和最大区域按照增加的方式进行显示。

等高线和轮廓绘制选项
在产生等高线和轮廓的第五步曾经提到过该选项，包含了绘制用颜色填充的等高线/轮廓线（替代默认的等高线/轮廓），指定待绘制等高线轮廓变量的范围，也包括在等高线轮廓中网格的部分显示，选择节点或单元的值进行显示，以及存贮等高线轮廓相关设置。

色彩填充等高线或轮廓图是用连续色彩显示的等高线或轮廓图形显示（如图 1），而不是仅仅使用线条来代表指定的值。(注意一个色彩填充的轮廓显示通常被当作“地毯图”)。可以在生成等高线和轮廓的第五步选中等高线对话框中的 Filled 选项来绘制一个色彩填充的等高线或轮廓图。

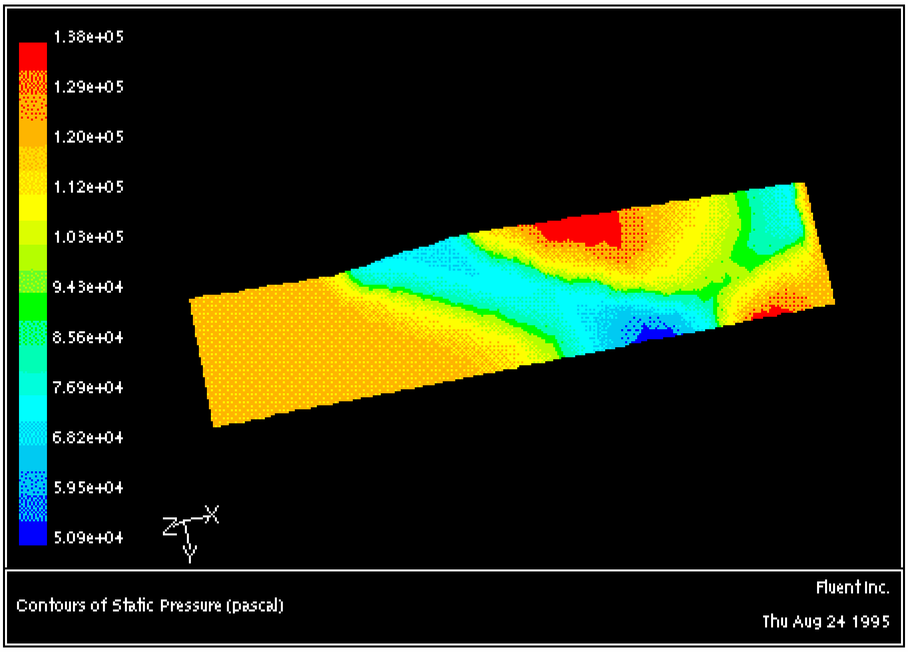


图 1：色彩填充的静态压力等高线图

为了使显示效果光滑，你可以通过打开光源并选择一个适合的光线插值方法来完成，而不是在显示选项对话框或光线对话框中进行相关设置。 请注意如果 Clip to Range 选项一旦被选中，你所得到的图形将不会光滑（参考等高线轮廓绘制选项）。

默认情况下，等高线或轮廓的变化范围通常被设置在求解对象结果的变化范围内。这意味着在求解对象内色彩变化将以最小值（显示在 Min 区域）开始，以最大值（显示在 Max 区域）结束。如果你绘制的等高线或轮廓只是求解对象的一个子集（例如一个表面），你的绘制结果可能只覆盖色彩变化的一部分。例如，假设用蓝色代表 0，用红色代表 10，而你绘制的表面变化只是从 4 到 6，由于绿色是由蓝到红的中间色彩，因而你绘制的图像上很可能是绿色的等高线或轮廓。如果你关心的值在一个小范围内变化，如让蓝色代表 4 而红色代表 6，你可以自己设置显示的范围。另外一个自己设定显示范围的原因是你只关系特定的值。例如，如果你想了解哪个区域的压力超过了特定的值，你可以增加显示的最小值，压力低于该值后不再被显示。

如果希望自己设置等高线/轮廓的显示范围，首先使等高线对话框中的 Auto Range 选项处于实效状态。Min 和 Max 编辑框则处于可编辑状态，然后你可以输入显示的范围。在显示默认范围时，点击 Compute 按钮将更新 Min 和 Max 的值

在你绘制色彩填充等高线/轮廓（如前在等高线轮廓选项中描述），你可以控制值超过显示范围的值是否显示。Clip to Range 选项的默认状态为选中，这使得超出显示范围的值不被显示（例如不绘制其等高线/轮廓）。但是如果您使其处于实效状态，低于 Min 的值将会以代表最低值的色彩进行显示，而高于 Max 的值将以代表最高值的色彩进行显示。图 2 和图 3 则分别显示了选中/未选中 Clip to Range 选项时的绘制结果。

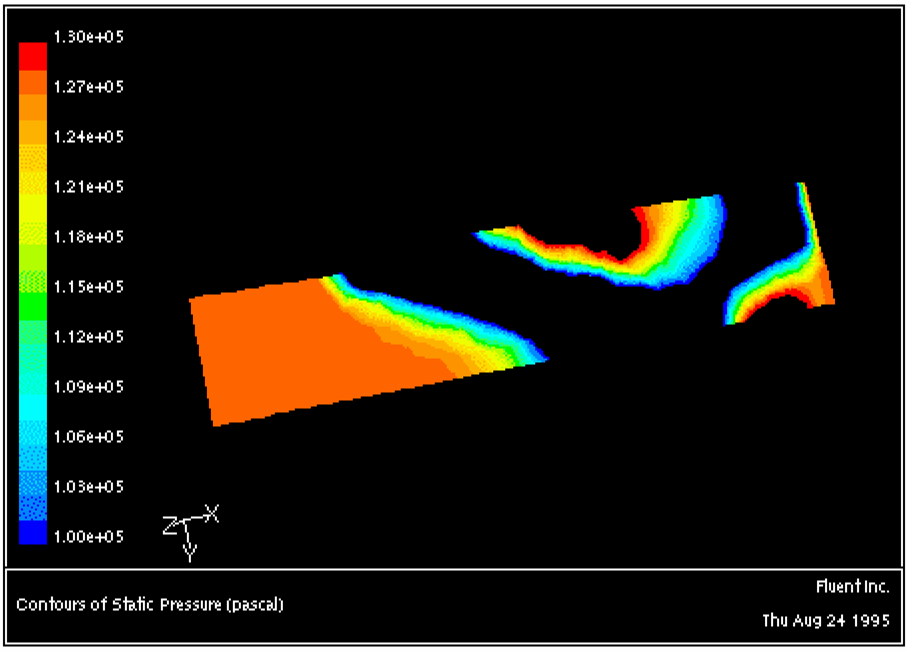


图 2: 选中 Clip to Range 选项时的绘制结果

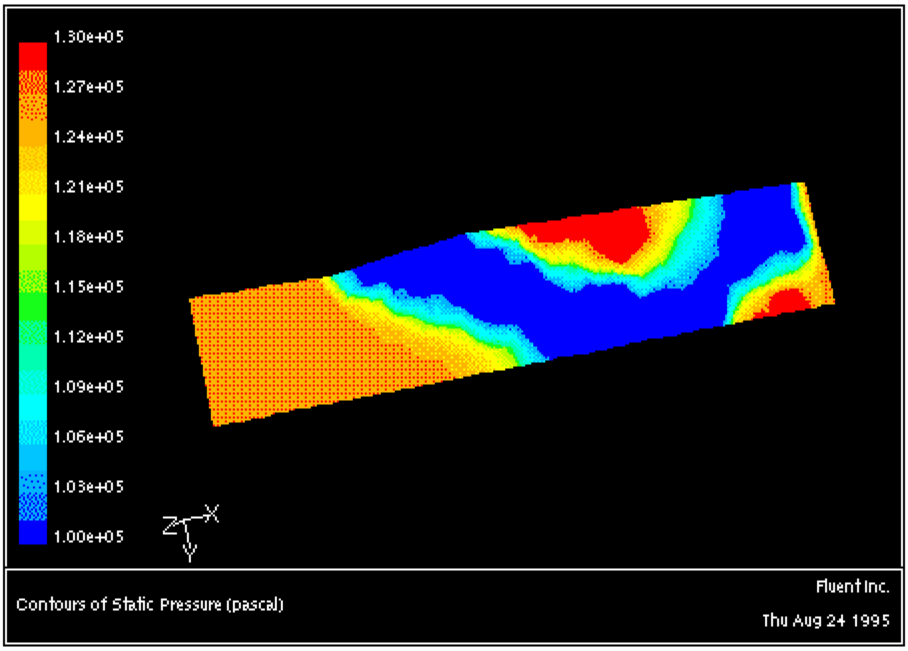


图 3: 未选中 Clip to Range 选项时的绘制结果

对于一些问题，尤其时 3D 几何体，你很可能希望在等高线/轮廓中包含部分网格作为空间参考点。例如你希望在等高线中显示入口和出口的位置。这可以通过选中等高线对话框中的 Draw Grid 选项完成。当你选中 Draw Grid 选项后，显示对话框将会出现，在这个对话框中你可以设置网格显示参数。当你点击等高线对话框中的 Display 按钮，在等高线/轮廓中将会显示出按照在网格显示对话框中定义的网格。

在 Fluent 中，可以选择显示计算得到的单元节点中心的值或者按照插值计算的节点的值。默认情况下，Node Values 选项被选中，插值计算的节点值被显示。对于等高线或轮廓，总是采用节点的值。如果你要显示色彩填充的等高线或轮廓，最好采用单元节点中心值，使用该值只需将 Node Value 选项关闭。采用节点值绘制色彩填充等高线/轮廓将按颜色的层次进行光滑显示，而使用单元节点中心值绘制的色彩填充的等高线/轮廓则会显示出一个单元到其邻接单元颜色的显著变化。

如果你需要绘制一个多孔或扇叶的显示图像，来描述一个脉冲或其它不连续或跳跃的变量，应该采用单元节点中心值，如果你在该情况下使用节点值，不连续效果将会由于节点的平均而不会在图像中清晰的显示。

对于频繁使用的等高线变量和选项，你可以在等高线对话框中指定一个 Setup number，并设定所需信息以此来生成等高线图形。当你单击 Display 按钮，所设定的 Contours Of, Min, Max 以及表面参数将被存储。你可以将 Setup number 设置成一个未被使用的值（如，一个没有存储任何信息的 ID 号）然后生成一个不同的等高线图形。要按存储的信息显示图形，只需将 Setup number 重新设置成你保存信息的变化，然后单击 Display 即可。你可以保存 10 个不同的编号。

！注意等高线层的数目，在网格显示对话框（当 Draw Grid 选项被激活）中选定要显示的表面，以及在轮廓选项对话框（当 Draw Profiles 选项被激活）中对轮廓的设定均不会在 Setup 中存储，同时 Setups 也不会被存储到工作文件中。

绘制速度向量

你可以在求解对象或选中的表面上绘制速度向量。默认情况下， 速度向量被绘制在每个单元的中心（或在每个选中表面的中心），用长度和箭头的颜色代表其梯度（图 1）。通过几个向量绘制设置参数，可以修改箭头的间隔，尺寸和颜色。注意在绘制速度向量时总是采用单元节点中心值；不能采用节点平均值进行绘制。

.

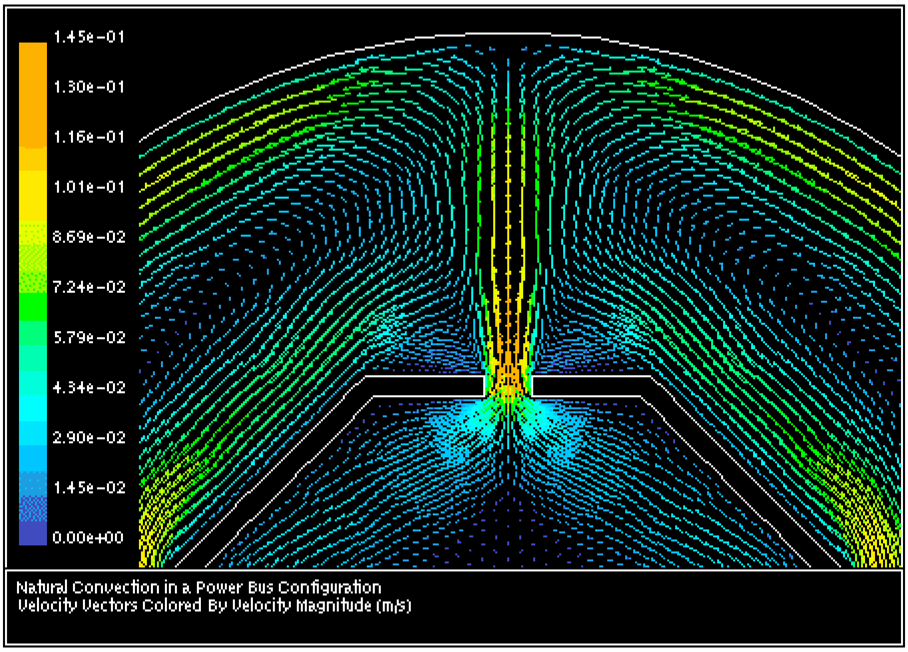


图 1: 速度向量图

生成速度向量图的步骤
速度向量图选项

生成速度向量图的步骤

可以通过速度向量对话框来生成速度向量图 (如图 1).

Display ?Velocity Vectors...

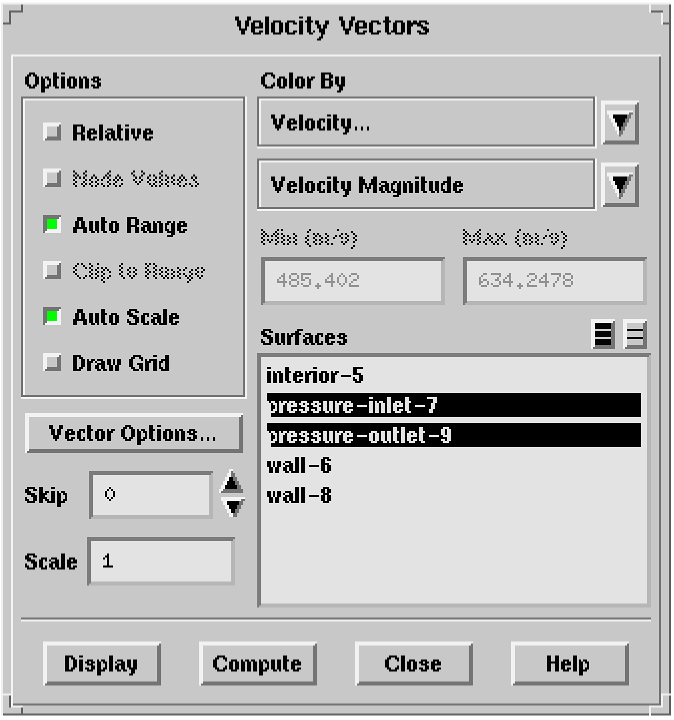


图 1: 速度向量对话框

生成向量的基本步骤如下：

1．在 Surfaces 列表中，选择你希望绘制其速度向量图的表面。如果希望显示的对象为整个求解对象，不要选择列表中的任一项。

2．设置速度向量对话框中的其它选项。

3. 单击 Display 按钮在激活的窗口中绘制速度向量图。

速度向量绘制选项

在生成步骤中的第 2 步提到的其它选项包括向量箭头比例因子，忽略一些向量的显示，使用相当速度梯度（为了移动参考面和移动网格），在数据表面显示速度向量，显示固定长度或固定颜色的向量，显示速度向量各方向的组成，指定显示的变化范围，对一个纯量场的速度向量进行色彩渲染，显示部分网格的速度向量，改变箭头的类型和比例。

大部分普通选项都是通过速度向量对话框的选项进行设置，而一少部分则是在向量选项对话框中设置的（如图 1），可单击速度向量对话框中的 Vector Options 打开该对话框

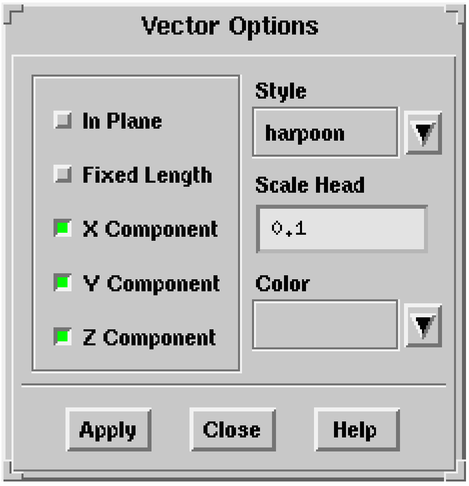


图 1 向量选项对话框

默认情况下,速度向量是自动缩放的以便在没有任何向量被忽略时重叠的向量箭头最少。(参看速度向量绘制选项，以使向量绘制更加清晰)。通过 Auto Scale 选项，可以修改比例系数（默认情况为 1） 增加或减少 默认 "auto scale"的值。采用自动比例的优点时当比例系数为 1 时，不管求解对象的尺寸，向量显示将会很合适，给你了一个调节比例系数以便更好显示向量图的起点。

如果你关闭 Auto Scale 选项，速度向量将会被按照实际的尺寸和比例系数（默认为 1）进行绘制。一个向量的“实际”尺寸时该点的速度梯度。一个速度梯度为 100m/s 的点其向量将被绘制成 100 米长，不过求解对象是 0.1m 还是 1000m。你可以在速度向量对话框中通过修改向量比例系数的值使该向量尺寸（实际尺寸和比例系数的乘积）达到你的要求。

如果你的向量显示图上包含了太多的箭头导致你不能理解该图,你可以通过设置速度向量对话框中的 Skip 值为该向量图“减肥”。默认情况下，Skip 的值为 0，这意味着每个求解对象或平面上的向量都被显示（假设有 n 个向量）。如果将 Skip 增大到 1，将会有 n/2 各个向量。如果增大到 2，将会产生 n/3 个向量，等等。对表面的选择（或求解对象单元）将会决定哪一个向量被忽略或被绘制；因此当 Skip 的值不为 0 时，调整选择顺序将会改变速度向量图。

如果在你求解问题时使用了一个或多个移动参考面或者移动网格，那么你可以选择显示绝对速度向量或者相当速度向量。选中速度选项对话框中的 Relative 选项时，会按照设定的参考值以参考面为基础绘制向量。参看设置参考区来获得更详细的细节（如果你建立了一个旋转参考面，你不需要指定参考区域，会以旋转参考面为基础绘制速度向量）。如果你为选中 Relative 选项，在绘制向量图时会以绝对、固定的参考面为基础进行绘制。

对于一些问题，你可能对垂直于流场部分的可视化感兴趣。这些“二次流”部分通常比沿着流动方向的部分要小，因此当流动方向部分也显示的时候就很难观察它。为了方便的观察垂直流场部分，可以在向量选项中选中 In Plane 选项。当该选项被选中时，FLUENT 只显示选中面内的速度向量图。如果选中的表面时一个交叉的流对象，将会显示垂直于该流场的速度向量图。图 2 显示了选中 In Plane 时生成的速度向量图（注意这些向量被转化到求解对象的外部，正如在一个场景中改变求解对象的外形中所述，所以可以很方便的被观察）

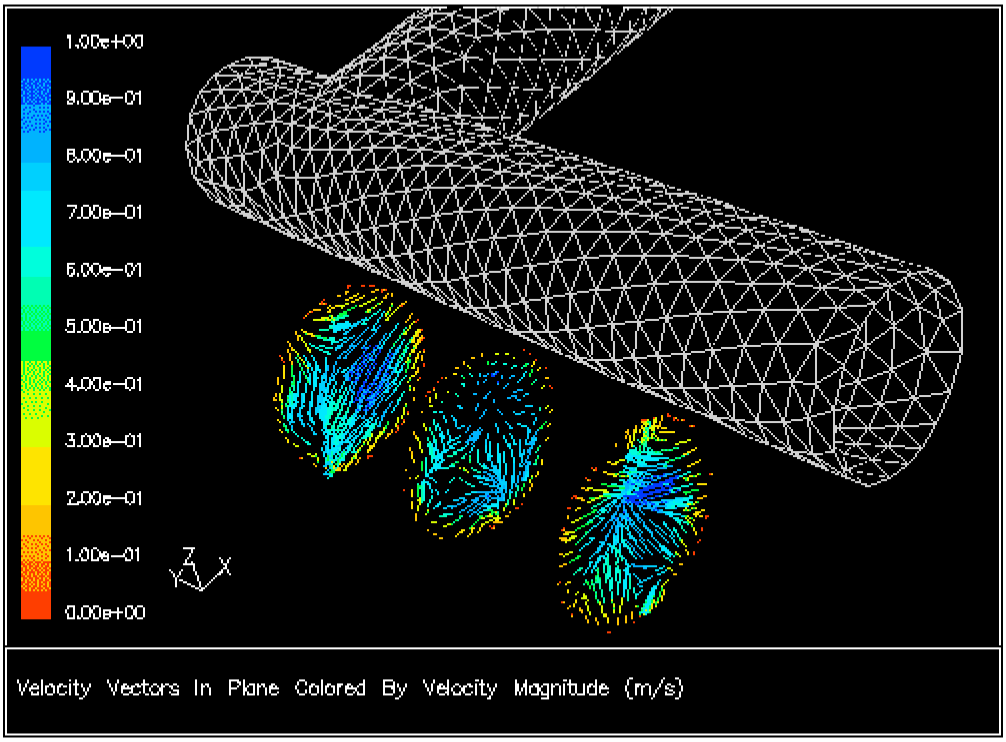


图 2: 使用 In Plane 选项生成速度向量图。

默认情况下，一个向量的长度和它的速度梯度成正比。如果你希望所有的向量以相同的长度进行显示，则可以通过在向量选项对话框中选中 Fixed Length 选项实现。要修改向量长度，请在速度向量对话框中调整比例系数的值。

默认情况下，速度向量的各个笛卡儿坐标的份量都将显示，所以箭头指向为沿着物理空间的矢量方向，有时一个方向上的份量非常大，例如 x 方向。在这种情况下，你可能希望缩小 x 方向的分量以便观察 y、z 方向的份量。要压缩一个或多个速度向量分量，请在向量选项对话框中关闭相关选项（X, Y 或 Z 分量）。

默认情况下，在速度向量显示中包含的速度变化范围通常时按照求解对象的速度梯度变化范围进行设定的。如果你想观察一个小范围内值的变化，你可以重新限定显示的范围。用来代表速度向量显示的色彩将会随之显示范围值的变化而变化。（你也可以按照速度梯度颜色的渲染将一个纯量场改变为其它纯量场）。

手工设置速度梯度的变化范围（或者通过颜色下拉列表框改变纯量场的范围），可在速度向量对话框中关闭 Auto Range 选项。Min 和 Max 编辑框处于可编辑状态，然后你可以在其中输入新的范围值。例如，你需要显示速度梯度大于 150m/s 而且小于 300m/s 的区域，你可以将 Min 设置为 150 而 Max 为 300。同样，如果你对静态压力向量进行渲染，你可以只显示压力为某一个特定值的曲艺。在显示默认范围的时候，单击 Compute 按钮将更新最小及最大值。

当你限制了速度向量显示的范围后，你也可以控制超出这个范围的值是否显示。当选中 Clip to Range 选项时（默认选项），不显示超出设定范围的值。而当该选项未被选中时，高于最大值的值将以代表最大值的颜色进行显示。这一点和显示色彩填充等高线相似。（参看等高线轮廓绘制选项中的图 2、图 3）

如果你希望以其它量场而非速度量场对向量进行渲染，可以通过在 Color By 下拉列表框中选择一个不同的变量或函数来实现。按照上面的列表选择你所希望的分类，然后从下面的列表框中选择相关量。如果你选择了静态压力，例如，速度向量将仍和速度梯度有关，但是速度向量的颜色将和每一点的压力有关。

如果你希望所有的向量都以相同的颜色进行显示，则可在速度选项对话框中的 Color 下拉列表框中指定所使用的颜色。如果没有选择任何颜色（例如，下拉列表框中最上面的选项也是默认选项——空格），向量的颜色将由速度向量对话框中的值为 field 的 Color By 的选项决定。单色向量显示通常在等高线和速度向量叠加图中很有用。

对于一些问题，尤其是复杂的 3D 几何体，你很可能希望在你的向量图中包含部分网格作为空间参考点。例如，你想在速度向量图中显示入口和出口的位置。上述任务可以通过在速度向量对话框中打开 Draw Grid 选项来完成。当你选中 Draw Grid 选项时，网格显示对话框将自动打开，可以通过该对话框设置网格显示参数。当你单击速度向量对话框上的 Display 按钮后，按照你在网格显示对话框中的设置，在速度向量图中将会显示部分网格。

Fluent 总共有 5 中不同类型的箭头提供给你使用。可在 Style 下拉列表框中选择 cone，filled-arrow, arrow, harpoon 和 headless 类型。默认箭头为 harpoon 类型。

如果你选则的箭头类型中包含了头部，你可以通过向量对话框中的 Scale Head 来修改箭头的大小尺寸。

显示轨迹

轨迹被用来显示求解对象的质量微粒流。粒子由你在 Surface 菜单中定义的一个或多个表面中释放出来（参看为显示图形和数据产生表面）。现形或楔行面经常被使用（参考线形和楔形面）。图 1 显示了一个轨迹图。

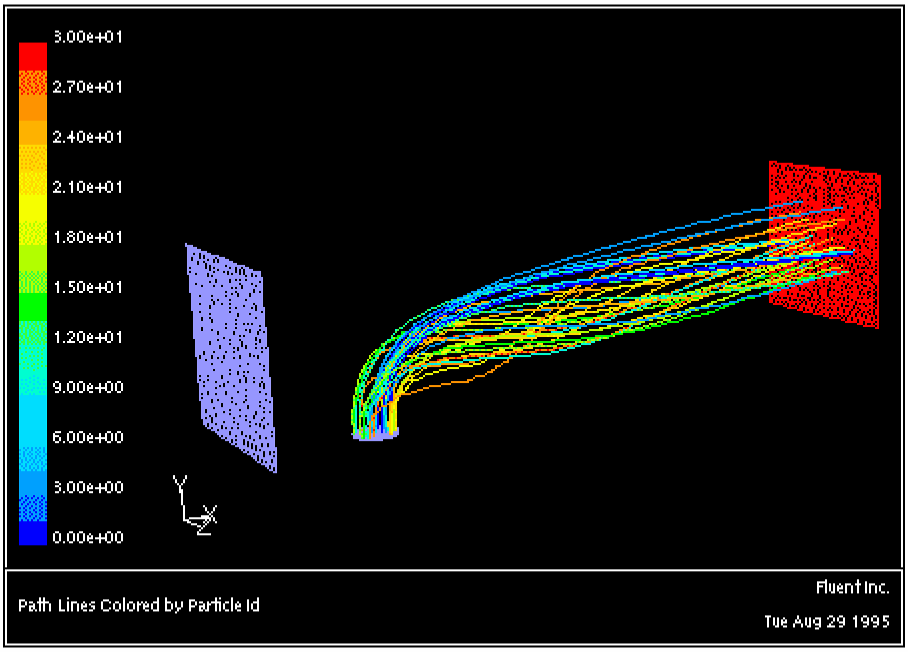


图 1: 轨迹图

注意显示固态相微粒轨道在轨道的图形显示章节进行讨论。

产生轨迹的步骤
绘制轨迹的选项

产生轨迹的步骤

可以通过轨迹线对话框来完成轨迹的生成 (如图 1).

Display ?Path Lines...

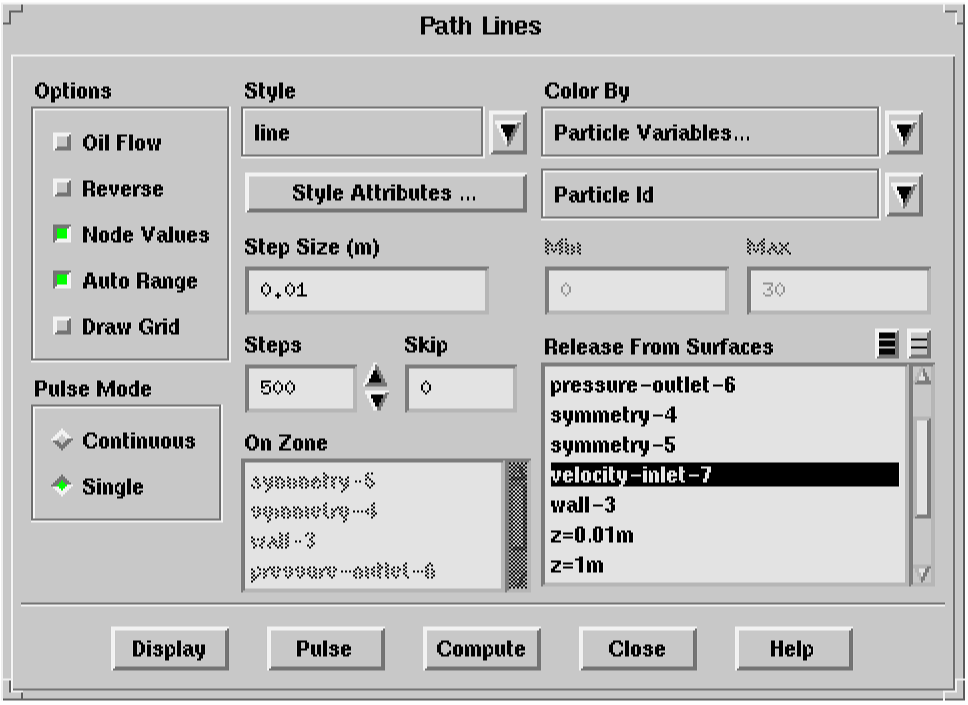


图 1: 轨迹线对话框 l

产生轨迹线的基本步骤如下：

1． 在 Release From Surfaces 列表中选择相关平面。

2．设置 Step size 和 Steps 的最大数目。Step Size 设置长度间隔用来计算下个各微粒的位置。（注意当一个微粒进入/离开一个表面是其位置通常由计算得到；即便你指定了一个很大的 Step Size，微粒在每个单元入口/出口的位置仍然被计算并被显示）。Steps 设置了一个微粒能够前进的最大步数。当一个微粒离开求解对象并且其飞行的步数超过该值时将停止。如果你希望微粒能够前进的距离超过一个长度大于 L 的求解对象，一个最简单的定义上述两个参数的方法是是 Step Size 和 Steps 的乘积应该近似等于 L。

3． 设置轨迹线对话框中的其它选项。

4． 单击 Display 按钮绘制轨迹线，或者单击 Pulse 按钮来显示微粒位置的动画。在动画显示中 Pulse 按钮将变成 Stop 按钮，你可以通过单击该按钮来停止动画的运行。

第 26 章 文字报告

FLUENT 提供了许多计算和报告表面和边界积分值的工具。这些工具可以让用户得到通过边界的物质质量流率和热量传递速率，在边界处的作用力以及动量值，还可以得到在一个面上或者在一个体中的面积、积分、流率、平均值和质量平均值（其它量）。另外，用户还可以得到几何形状和求解数据的直方图，设置无因次系数的参考值以及计算投影表面积。用户也能打印或者存储一个包括当前 case 中的模型设定、边界条件和求解设定等情况的摘要报告

下面的章节将详细介绍这些特性：

26.1：报告约定

26.2：通过边界的流量

26.3：边界上的作用力

26.4：计算投影面积

26.5：表面积分

26.6：体积分

26.7：直方图报告

26.8：参考值设定

26.9：case 设定的摘要报告

针对离散相的报告工具已在 19.13 节中描述。

26.1 报告约定

针对 2D 问题，FLUENT 计算所有变量每个单位厚度的积分值。对于轴对称问题，FLUENT 计算一个弧度为 2π 的角度内的所有积分值。

26.2 通过边界的流量

针对选择的边界区域，用户可以计算下列值：

边界的质量流率可以通过加和边界区各个面的质量流率得到，各个面的质量流滤等于密度乘以速度矢量和相应面的投影面积的标量积。

边界处总的传热速率可以通过加和各个面的总传热速率得到。各个面的传热速

率为：$q = q_c + q_r$，其中 q_c 为对流传热速率，q_r 为辐射传热速率。穿过一个面的热传导的计算与指定的边界条件有关。例如，在一个温度不变的墙面上，传导的热量等于热传导率和投影面积及温度梯度的乘积。对于流动边界条件，总的传热速率是藏量的流动速率。根据选择使用的模型，总的传热速率可能包括对流传热或总热焓、能量的扩散通量等。

通过一个边界的辐射传热速率等于通过每个面的辐射传热速率 q_r 之和。辐射传热的计算与所使用的计算模型有关。

例如，用户可以使用流量报告计算通过一个出入口均设定为压力边界条件的管道的质量流量。

包含颗粒和体积源的流动的流量报告

需要注意的是报告的质量和热量平衡处理的仅仅是穿过边界而进入和离开主体的流动，不包括用户定义的体积源或颗粒喷射的作用。由于这个原因，质量或热量不平衡的情况也可能在报告中反映出来。为了判定一个包含离散相的解是否收敛，用户可以进行不平衡比较，这种不平衡比较是在颗粒轨道概要报告中对质量流量或热量计算进行改变得到的。在 Flux Reports 面板中报告的净流率或净热传输率应当是接近等于在概要报告中的 Mass Flow 或 Heat Content 的改变值，这个报告在 Particle Tracks 面板中生成。

26.2.1 生成流量报告

使用 Flux Reports 面板获得在选择的边界区域上的质量流率、热传输率或者辐射热传输率，如图 26.2.1 所示。

Report → Fluxes…

报告的生成步骤如下：

1．从 Options 选项中选择哪一项流量要被计算：Mass Flow Rate、Total Heat Transfer Rate 或者 Radiation Heat Transfer。

2．从 Boundaries 列表中选择用户想获得流量数据的边界区域。

如果用户想选择几个相同类型的边界区域，可以通过在 Boundary Types 选项中选择类型来代替在 Boundaries 列表中的选择。所有与被选定的类型相同的边界区域

将自动在 Boundaries 列表中被选择(或者如果所有的边界已经被选择,则为不选择)。

另外一个捷径是说明一个 Boundary Name Pattern 并且用鼠标单击 Match 按钮以选择那些名字中带有用户输入字符的边界区域。例如，如果用户输入 wall*，则所有名字开始为 wall 的边界将被自动选择（如 wall-1、wall-top 等）。如果这些边界已经被选择，则该操作将使这些选择被取消。如果用户输入 wall?，则所有名字中包含 wall，且 wall 后面只有一个字符的边界将被选择（如果这些边界已经被选择，则该操作将使这些选择被取消）。

3．鼠标单击 Compute 按钮，Results 列表框将显示已选择的每一个边界区域的选定的流量计算结果，并且在 Results 列表框下面的 Box 将显示单个区域流量的加和结果。

注意：这些流量被准确地报告，如同被求解器计算的一样。因此，这些结果从本质上讲比那些通过打开 Surface Integrals 面板中的 Flow Rate 选项(具体描述见 26.5 节）计算的结果要更加准确。

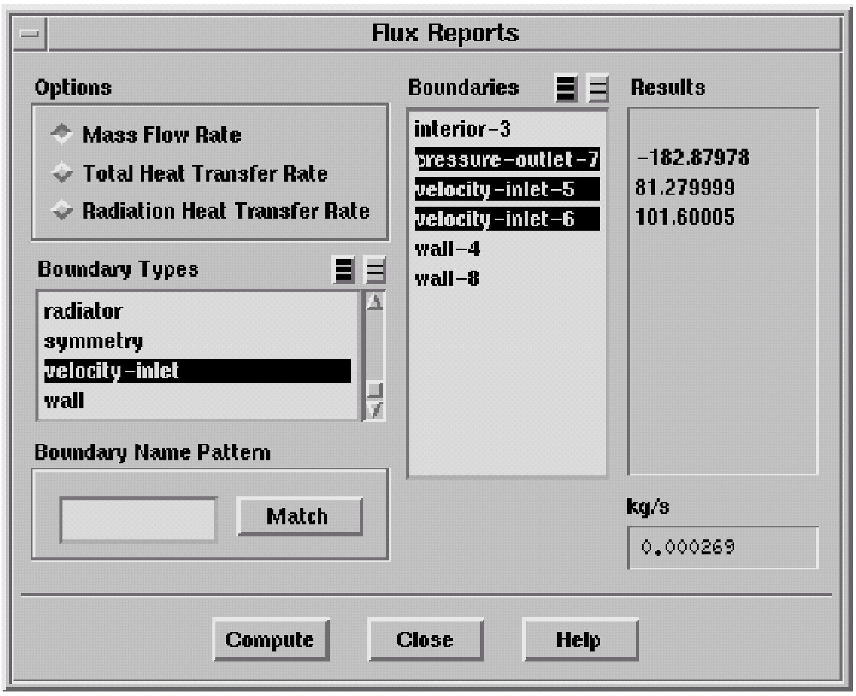


图 26.2.1 Flux Reports 面板

26.3 边界上的作用力

用户可以计算和报告沿着一个说明的矢量方向的作用力以及关于已选择的墙区

域的一个指定的中心位置的力矩。这个特性可以被用于报告像升力、曳力及一个机翼计算的动量系数等空气动力学系数。

26.3.1 计算作用力和力矩

在一个墙区域处的作用力的计算是通过将每一个面上的压力和粘性力以及指定方向的矢量的标量积相加得到。除了实际的压力、粘度和总的作用力之外，相关联的作用力系数也可以通过在 Reference Values 面板中说明的参考值计算得到（如在 26.8 节中描述的一样）。作用力系数被像作用力一样定义如下：$\frac{1}{2}\rho v^2 A$，其中 ρ 、v 、A 指的是在 Reference Values 中被明确说明的密度、速度和面积。最终，对所有已选择的墙区域的压力、粘度和总的作用力的总和将以两种形式显示：有量纲形式和无量纲系数形式。

对一个指定中心的力矩矢量是通过加和力矩矢量方向上每一个面的作用力矢量来计算——例如，将每一个面上在力矩中心处的作用力加和。除了压力、粘度和总的力矩的实际组成部分之外，力矩系数也被得到。力矩系数被如力矩一样定义作为参考动态压力、参考面积和参考长度的结果。最终对所有已选择的墙区域的压力、粘度和总的力矩的总和将以两种形式显示：有量纲形式和无量纲系数形式。

为了减少舍入错误，参考压力（也在 Reference Values 面板中说明）被用于规格化用于计算压力的网格压力。例如，净压力矢量被做为每一个面的单独的作用力矢量的矢量和：

$$\vec{F}_p = -\sum_{i=1}^{n}(p - p_{ref})A\hat{n} \qquad (26.3-1)$$

$$= -\sum_{i=1}^{n} pA\hat{n} + p_{ref}\sum_{i=1}^{n} A\hat{n} \qquad (26.3-2)$$

其中 n 是面的数量，A 是面的面积，$\hat{n}$ 是指向面的单位法向量。这个规格化的过程在计算开放区域的总作用力系数时已经暗示了。对于封闭区域，通过参考压力面板引入了附加项，但是对于开放领域，压力规格化引入了一个净作用力平衡，这个净作用力平衡是针对主体不可缺少的投影面积和指定参考压力而言。

26.3.2 生成一个作用力或力矩报告

使用 Force Reports 面板来获得指定墙区域内沿着一个说明的矢量方向的作用力或关于一个指定的中心位置的力矩的报告（见图 26.3.1）。

Report → Forces…

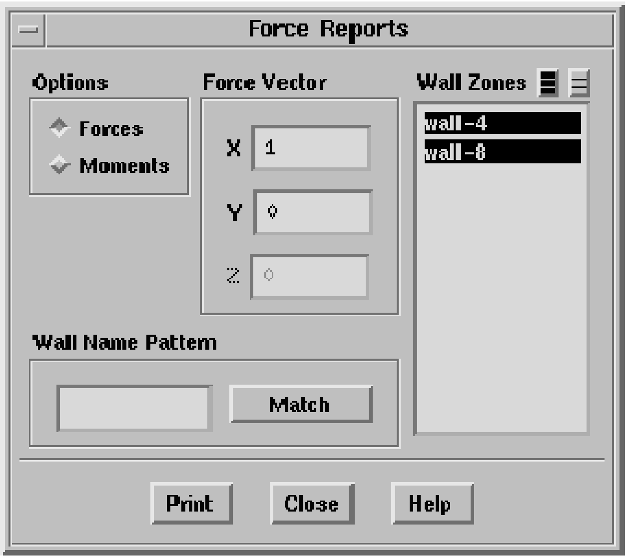


图 26.3.1　Force Reports 面板

生成报告的步骤如下：

1．通过在 Options 下选择 Forces 或 Moments 来说明用户想得到的报告。

2．如果用户选择的是一个作用力报告，则需要在 Force Vector 选择中说明作用力的 X、Y 和 Z 组分中哪一个将被计算。如果用户选择的是一个力矩报告，则需要在 Moment Center 选择中说明力矩的 X、Y 和 Z 坐标中哪一个将被计算。

3．在 Wall Zones 列表中选择用户想要得到作用力和力矩信息报告的区域。

如果用户需要选择多个边界墙，那么一个可用的快捷方法是说明一个 Wall Name Pattern，之后单击 Match 按钮来选择名字和用户输入的名字匹配的边界墙。例如，如果用户说明 out*，所有名字开始为 out 的墙（如 outer-wall-top、outside-wall）将被自动选择。如果这些墙已经被选择，则已做的选择将被取消。如果用户输入 out?，则所有名字中包含 out，且 out 后面只有一个字符的墙将被选择（如果这些墙已经被选择，则该操作将使这些选择被取消）。

4．鼠标单击 Print 按钮。在操作台窗口（文本窗口）中将显示出对于已选择的墙沿着指定的作用力矢量方向或关于指定的力矩中心的压力、粘度（如果适当的话）

和总作用力或力矩，以及压力系数、粘度系数、和总作用力或力矩系数。对所有已选择的墙的系数和作用力及力矩的总和将显示在报告的末端。

26.4：计算投影面积

用户可以使用 Projected Surface Areas 面板（见图 26.4.1）对已选择的面沿着 x、y 或 z 轴方向（例如在 yz、xz 或 xy 平面上）计算估计的投影面积。

Report → Projected Areas…

计算投影面积的过程如下：

1．选择投影方向（X、Y 或 Z）。

2．在 Surfaces 列表中选择要计算投影面积的的面。

3．设置 Min Feature Size 为用户在面积计算中想求解的面中几何尺寸最小的面的特征长度（如果用户不能确定最小的几何特征的尺寸，也可以使用开始软件设定的缺省值）。

4．鼠标单击 Compute 按钮，面积值将出现在 Area 框和控制台窗口中。

5．为了改善面积计算的精确度，用户可以降低 Min Feature Size 到原来值的一半再计算。重复这个过程直到计算出的面积值不再改变（或内存容量不足）。

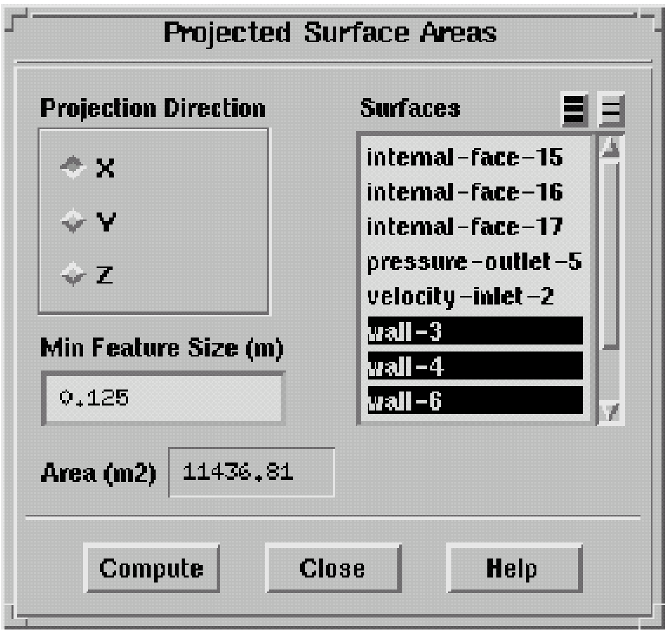


图 26.4.1 Projected Surface Areas 面板

这一特性仅仅再 3D 情况下可以使用。

26.5：表面积分

用户可以对一个主体中的选择的面上选定的场变量进行计算，这些场变量包括：面积或质量流率、或者积分、面积加权平均、流率、质量加权平均、加和、面平均、面最大值、面最小值、顶点平均、顶点最小值、顶点最大值等等。面是 FLUENT 软件在与用户使用的模型相关的每一个区域中创建的数据点，或者是用户使用如 24 章中所描述的方法定义的数据。

由于面可以被放置在主体地任意位置，所以在每一个数据点处的变量值都是由节点值线性内插得到。对于一些变量，它们的节点值由求解器明确的计算得到，然而对另外一些变量，仅仅网格中心处的值被计算，节点处的值通过平均网格处的值得到。这些连续插值可能导致在面综合报告中的一些小的错误（在 27 章中说明了那些变量的节点值被计算）。

下面列出使用几种类型的表面积分报告的例子：

- 面积：用户可以计算速度入口区域的面积，然后根据质量流率估计出速度：

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} \qquad (26.5-1)$$

- 面积加权平均：用户可以得到一个固体表面的平均值，例如在一个指定了温度的墙面上的平均热流量。
- 质量平均：用户可以得到一个流体表面的平均值，例如在一个速度入口处的平均热焓。
- 质量流率：用户可以计算通过一个速度入口的质量流率，然后如前面所讲的由面积估计出速度。
- 流动速率：用户可以通过计算热焓的流动速率来得到通过一个表面的热传输率。
- 积分：用户可以使用积分来进行更复杂的计算。这些计算可能包括使用如 27.5 节所介绍的 Custom Field Function Calculator 面板来计算一个需要积分计算的函数（如涡数）。

26.5.1 计算面积分

面积

一个表面的面积是通过组成表面的每个小面的面积相加得到的。在表面上的这

些小面在形状上既可能是三角形也可能是四边形。

$$\int dA = \sum_{i=1}^{n} |A_i| \qquad (26.5\text{-}2)$$

积分

在一个表面上的积分值是通过将每个小面上的面积和选择的场变量的乘积加和得到的，例如密度或压力。每一个小面和主体中的一个网格相关联。如果小面是网格等值相交的结果，那么与这个小面相关联的场变量就是网格的值。如果小面是在边界面上，则会用一个内插的面值代替网格的积分值。这样做可以改善计算的准确度，并且保证结果与在边界和流量报告中报告的边界条件相匹配。

$$\int \phi dA = \sum_{i=1}^{n} \phi_i |A_i|$$

面积加权平均

一个量的面积加权平均是将选择的场变量和小面面积乘积得到乘积，然后将乘积加和，之后再用总的表面积相除得到。

$$\frac{1}{A}\int \phi dA = \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n} \phi_i |A_i| \qquad (26.5\text{-}4)$$

流率

一个量通过一个表面的流率是通过先计算每一个小面上的面积矢量和速度矢量的点乘，然后将点乘结果与密度与场变量相乘得到乘积，最后将每个小面上的乘积相加得到的。

$$\int \phi \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^{n} \phi_i \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \qquad (26.5\text{-}5)$$

质量流率

通过一个表面的质量流率的计算是先计算每一个小面上的面积矢量和速度矢量的点乘，然后将点乘结果与密度相乘得到每个小面的质量流率，最后将每个小面的质量流率相加得到的。

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^{n} \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \qquad (26.5\text{-}6)$$

质量加权平均

一个量的质量加权平均的计算方法为：等式右边为相除关系，其中分子为场变量乘以小面面积矢量和动量矢量点乘积的绝对值，然后加和；分母为小面面积矢量和动量矢量点乘积的绝对值，然后加和（表面质量流量）。

$$\frac{\int \phi \rho \left| \vec{v} \cdot d\vec{A} \right|}{\int \rho \left| \vec{v} \cdot d\vec{A} \right|} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \phi_i \rho_i \left| \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \right|}{\sum_{i=1}^{n} \rho_i \left| \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \right|} \qquad (26.5\text{-}7)$$

加和

在一个表面上的指定场变量的和是通过将每一个小面上的该变量的值相加得到。

$$\sum_{i=1}^{n} \phi_i \qquad (26.5\text{-}8)$$

面平均

在一个表面上的指定变量的小面平均指的是用总的面数 n 去除每一个小面上的该变量的值相加后得到的加和值。

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} \phi_i}{n} \qquad (26.5\text{-}9)$$

面最小值

在一个表面上，指定变量的面最小值是指该变量在该表面上的最小网格值。

面最大值

在一个表面上，指定变量的面最大值是指该变量在该表面上的最大网格值。

顶点平均

在一个表面上的指定变量的顶点平均指的是用总的节点数 n 去除每一个节点上的该变量的值相加后得到的加和值。

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}\phi_i}{n} \qquad (26.5\text{-}10)$$

顶点最小值

在一个表面上，指定变量的顶点最小值是指该变量在该表面上的最小节点值。

顶点最大值

在一个表面上，指定变量的顶点最大值是指该变量在该表面上的最大节点值。

26.5.2 生成一个面积分报告

为了获得所选表面的面积、质量流率、积分、流动速率、加和、面最大值、面最小值、顶点最大值、顶点最小值或质量、面积、面、顶点平均等指定变量的值，用户可以使用 Surface Integrals 面板（图 26.5.1）

Report → Surface Integrals...

生成报告的步骤如下：

1．在 Report Type 的下拉列表中选择 Area、Integral、Area-Weighted Average、Flow Rate、Mass Flow Rate、Mass-Weighted Average、Sum、Facet Average、Facet Minimum、Facet Maximum、Vertex Average、Vertex Minimum 或 Vertex Maximum 等用户想得到的报告类型

2．如果用户生成一个面积或质量流率报告，则忽略到下一步。否则在 Field Variable 下拉列表中选择用户在表面积分中想使用的场变量。首先在上面的下拉列表中选择用户希望得到的变量值所属的种类，其次在下面的下拉列表中选择相关的变量（对列表中变量的解释参见第 27 章）

3．在 Surfaces 列表中选择将要进行表面积分的面。

如果用户想选择几个相同类型的面，则可以通过在 Surface Types 列表中选择类

型来实现。所有与类型列表中被选定的类型一致的面将被自动选择（如果这些面已经被选择的话，则是取消选择）。

另外一个快捷的方法是说明一个 Surface Name Pattern，然后使用鼠标单击 Match 按钮选择那些名字与用户输入的名字相符的表面。例如，如果用户说明 wall*，所有名字开始为 wall 的面（如 wall-l、wall-top）将被自动选择。如果这些面已经被选择，则已做的选择将被取消。如果用户输入 wall?，则所有名字中包含 wall，且 wall 后面只有一个字符的面将被选择（如果这些面已经被选择，则该操作将使这些选择被取消）。

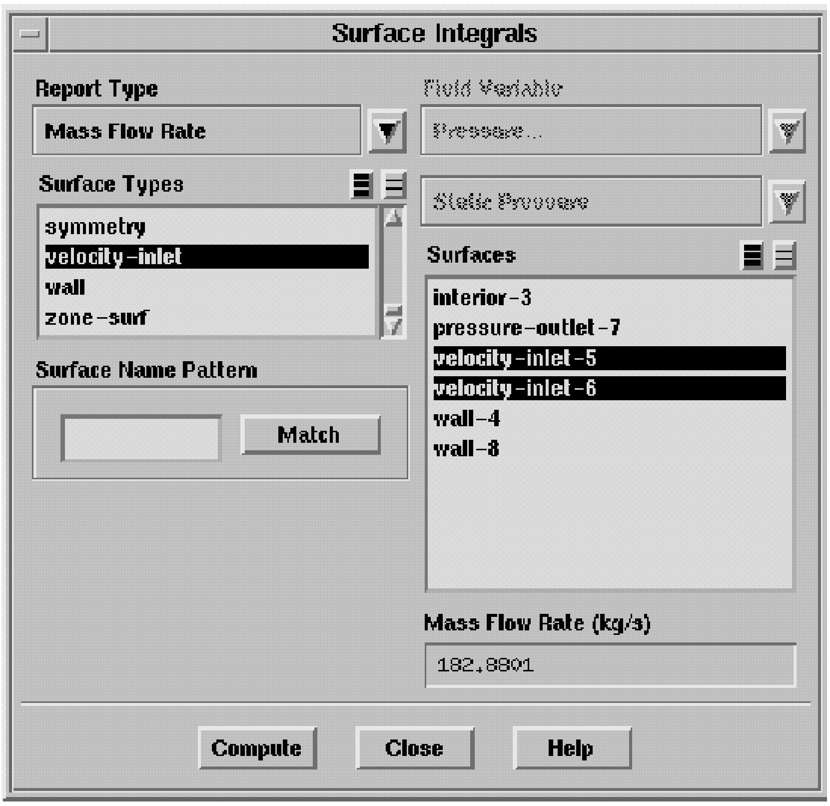


图 26.5.1 Surface Integrals 面板

4．鼠标单击 Compute 按钮。根据用户选择的不同，结果的标签将调整为 Area、Integral、Area-Weighted Average、Flow Rate、Mass Flow Rate、Mass-Weighted Average、Sum of Facet Values、Average of Facet Values、Minimum of Facet Values、Maximum of Facet Values、Average of Surface Vertex Values、Minimum of Vertex Values 或 Maximum of Vertex Values 等。

下面列出一些需要注意的地方：

- 质量平均加权指的是更高的速度范围（如那些有更高的质量流过的面）。
- 使用 Surface Integrals 面板报告的流动速率不如从 Flux Reports 面板中得到的结果真确（见 26.2 节的描述）
- 面和顶点平均参数建议使用在面积为零的表面。

26.6 体积分

用户可以对一个主体选定的网格区域中选定的场变量进行计算,这些计算包括：体积、加和、体积积分、体积加权平均、质量积分和质量加权积分等。

下面列出使用不同类型的体积积分报告的例子：

体积：通过体积报告，用户可以计算一个流体区域的总的体积。

加和：通过加和报告，用户可以合并离散相的质量或者能量源以便判断离散相的净转移量。用户也可以加和用户自定义的质量或能量源项。

体积积分：对于那些被存储的每单位体积的量，用户可以通过体积积分得到它们的净值（如通过对密度积分而得到质量）

体积加权平均：通过体积加权平均报告，用户可以获得质量源项、能量源项或离散相互相交换的量的体积平均。

质量积分：用户可以通过积分一个指定物种的质量分数得到它的总质量。

质量加权平均：通过质量加权平均报告，用户可以得到一个流动区域内的平均值（例如平均温度）。

26.6.1 计算体积积分

体积

一个表面的体积通过将包含区域在内的网格的体积相加得到。

$$\int dV = \sum_{i=1}^{n} |V_i|$$

加和

在一个网格区域上指定场变量的和是通过将选择区域中每一个网格上该变量的值相加得到。

$$\sum_{i=1}^{n}\phi_i \qquad (26.6\text{-}2)$$

体积积分

体积积分是通过将网格体积和选定的场变量的乘积相加得到。

$$\int \phi dV = \sum_{i=1}^{n}\phi_i |V_i| \qquad (26.6\text{-}3)$$

体积加权平均

一个量的体积加权平均是将选择的场变量和网格体积乘积得到乘积，然后将乘积加和，之后再除以总的体积得到。

$$\frac{1}{V}\int \phi dV = \frac{1}{V}\sum_{i=1}^{n}\phi_i |V_i| \qquad (26.6\text{-}4)$$

质量加权积分

质量加权积分是通过将密度、网格体积和选择的场变量的乘积相加得到。

$$\int \phi\rho dV = \sum_{i=1}^{n}\phi_i\rho_i |V_i| \qquad (26.6\text{-}5)$$

质量加权平均

一个量的质量加权平均的计算方法为：等式右边为相除关系，其中分子为选择的场变量乘以密度和网格体积，然后加和；分母为密度和网格体积的乘积，然后加和。

$$\frac{\int \phi\rho dV}{\int \rho dV} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\phi_i\rho_i V_i}{\sum_{i=1}^{n}\rho_i V} \qquad (26.6\text{-}6)$$

26.6.2 生成体积积分报告

为了获得选定的网格区域的体积或者指定变量的加和、体积积分、体积加权平

均、质量加权积分、或质量加权平均，用户可以使用 Volume Integrals 面板（见图 26.6.1）。

Report → Volume Integrals...

生成报告的步骤如下：

1．在 Options 下选择 Volume、Sum、Volume Integral、Volume-Average、Mass Integral 或者 Mass-Average 来说明用户想得到的报告类型。

2．如果用户想生成体积报告，则忽略到下一步。否则在 Field Variable 下拉列表中选择需要积分、加和或者平均体积积分的场变量。首先，在上面的下拉列表中选择希望的种类，然后从下面的列表中选择相关的量（对列表中变量的解释参见第 27 章）。

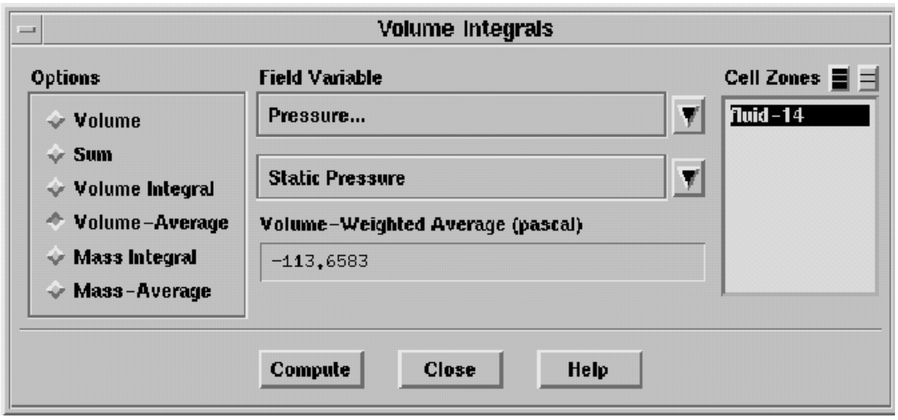


Figure 26.6.1: The Volume Integrals Panel

3．在 Cell Zones 列表中选择将要进行体积、加和、体积积分、体积加权平均、质量积分或质量平均的区域。

4．鼠标单击 Compute 按钮。根据用户选择的不同，结果的标签将调整为 Total Volume、Sum、Total Volume Integral、Volume-Weighted Average、Total Mass-Weighted Integral 或 Mass-Weighted Average 等。

26.7 直方图报告

在 FLUENT 中，用户可以在控制台窗口（文本窗口）中以直方图格式打印出几何和结果数据，或者在图形窗口中画出一个直方图。直方图的图形显示和定义过程

参见 25.8.7 节的内容。

网格的数目、选定变量或函数的范围和占内部网格总数的百分比将被报告，下面所列的是一个例子：

```
0 cells below 1.195482 (0 %)
 2 cells between 1.195482 and 1.196048 (4.1666667 %)
 1 cells between 1.196048 and 1.196614 (2.0833333 %)
 0 cells between 1.196614 and 1.19718 (0 %)
 0 cells between 1.19718 and 1.197746 (0 %)
 2 cells between 1.197746 and 1.198312 (4.1666667 %)
 1 cells between 1.198312 and 1.198878 (2.0833333 %)
 6 cells between 1.198878 and 1.199444 (12.5 %)
 9 cells between 1.199444 and 1.20001 (18.75 %)
 25 cells between 1.20001 and 1.200576 (52.083333 %)
 2 cells between 1.200576 and 1.201142 (4.1666667 %)
0 cells above 1.201142 (0 %)
```

用户可以使用 Solution Histogram 面板生成一个这样的直方图。

Report → Volume Histogram...

下面的步骤与 25.8.7 节所描述的生成图形直方图一样，唯一的区别只是用单击 Print 按钮代替单击 Plot 按钮。

26.8 参考值设定

用户可以控制参考值的设定，这些参考值被用于物理量和无因次系数的计算。而且参考值仅仅被用于后处理之中。

下面列出了一些使用参考值的例子：

- 使用参考面积、密度和速度计算作用力系数。另外还使用参考压力计算压力。
- 使用参考长度、面积、密度和速度计算力矩。另外还使用参考压力计算压力。
- 使用参考长度、密度和粘度计算雷诺数。
- 使用参考压力、密度和速度计算压力和总压系数。
- 使用参考密度、压力和温度计算熵。

- 使用参考密度和速度计算表面摩擦系数。
- 使用参考温度计算热传递系数。
- 使用特别的热比率计算涡轮机效率

26.8.1 设定参考值

使用 Reference Values 面板来设定用于计算归一化流场变量的参考值（见图 26.8.1）。

Report → Reference Values...

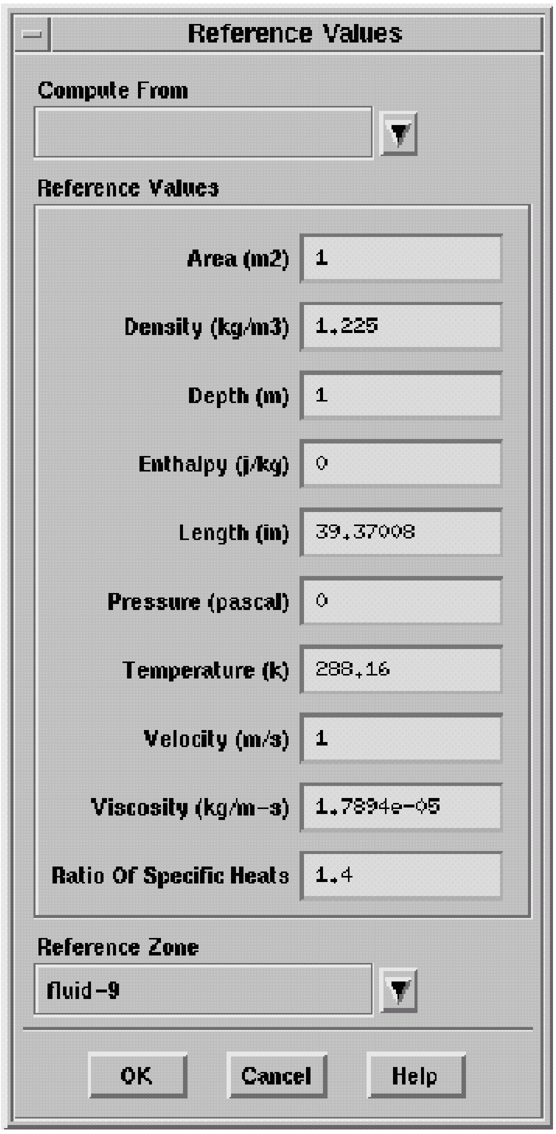


图 26.8.1 Reference Values 面板

用户可以手动输入参考值或者基于在选择的边界区域的物理量的值来计算参考值，能被设定的参考值有：Area、Density、Enthalpy、Length、Pressure、Temperature、Velocity、dynamic Viscosity 和 Ratio Of Specific Heats。对于 2D 问题，一个附加的量—Depth 也能被定义。这个值将将被用于报告流量和作用力（注意 Depth 的单位是在 Set Units 面板中与长度的单位分开单独设定的）。

如果用户想从一个特别边界区域的条件中计算参考值，需要在 Compute From 下拉列表中选择区域。然而需要注意的是与所使用的边界条件有关，仅仅一些参考值能被选择。例如，参考长度和面积不能在从边界条件中计算的参考值的情况下被设定；用户需要手动设定这些值。

对于手动设定参考值，用户只需要简单的在 Reference Values 标题下键入每个值即可。

26.8.2 设定参考区域

如果用户求解的流动包括多个参数或滑移网格，则可以画出速度和相对于指定“参考区域”的运动的其它相关量。在 Reference Zone 下拉列表中选择期望的区域，改变参考区域可以使用户获得相对于不同区域的运动的速度值（总压、温度等）。对于相对量的后处理的详细描述参见第 9 章。

26.9 Case 设定的摘要报告

用户有时可以发现得到用户 case 中的当前设定是很有用的。在 FLUENT 中，用户可以列出物理模型、边界条件、材料属性和求解控制等设定。这个报告可以让用户对当前的问题定义很快的有一个总的看法，而不用逐个设定面板的检查。

26.9.1 生成一个摘要报告

用户可以使用 Summary 面板得到一个摘要报告（见图 26.9.1）。

Report → Summary...

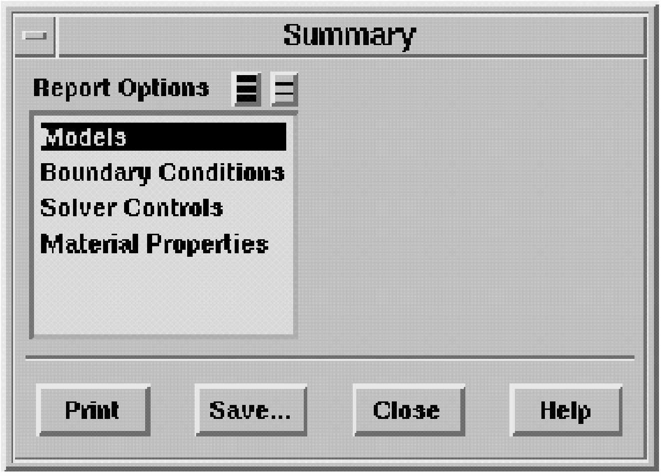


图 26.9.1　Summary 面板

获得一个摘要报告的步骤如下：

1. 在 Report Options 列表中选择用户想在报告中看到的信息（Models、Boundary Conditions、Solver Controls 和/或 Material Properties）。

2．如果用鼠标单击 Print 按钮，则信息被打印到 FLUENT 的控制台窗口里面；如果用鼠标单击 Save...按钮并且在 Select File 对话框中说明一个文件名，则信息会被存储在一个文本文件中。

第二十七章：流场计算中变量的定义

- 27.1 网格节点和控制体积值的估算
- 27.2 速率选择面板
- 27.3 可流场变量列表
- 27.4 流场变量（按阿拉伯字母顺序）列表及其定义
- 27.5 自定义流场函数

- 27.1 网格节点和控制体积值的估算

本文为后处理节电网格和控制体积网格估值提供了两种方法，如下：“面”是指在面板操作中由面、线、点相交而产生的。在大多数例子中，面是有交叉计算区域和现有的面相交而产生的。

27.1.1 控制体积估值

FLUENT 将变量储存在控制体积中，为了后处理方便，整个计算区域都一起赋值给控制体积。一个“面”控制体积的值就是由“面”上的面、线或点分割出的控制体积的值。因为一个“面”上的面和线是以有的控制体积网格和等值交叉建立的，这是一个唯一的定义。在控制体积分界线上的控制体积估值是在控制体积里接近分界线的估值。

27.1.2 网格节点的估值

网格节点估值由平均控制体积数据来准确的获得。各种边界条件都会影响在边界范围处流场变量的估值，所以要准确定义在这些边界区域的网格节点值。另外，在所有的节点处，明确节点值对许多变量（例如：节点坐标）都有用。对大多数变量，网格节点值是由共有此节点的所有控制体积的平均数据计算所得。

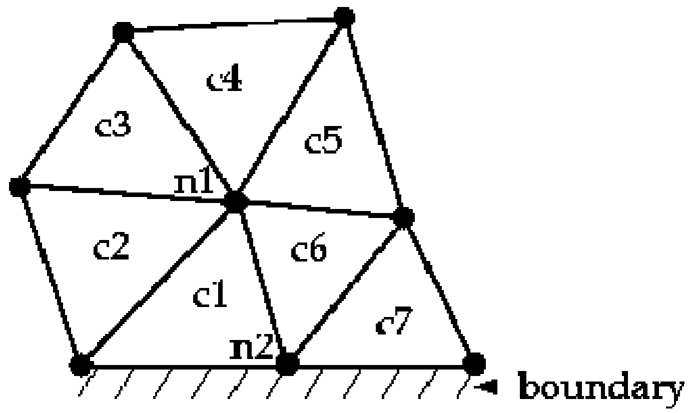
计算节点值由两个步骤：

1. 每个节点的原始值是共有此节点的所有控制体积的平均值。
2. 在分界线处，这些节点值是边界值（如果有效）。（表 27.3.1-27.3.14 的 bnv 可说明在边界线处节点值对变量是否有效。）

例如，在图 27.1.1，节点 n1 的值由共有此节点的控制体积 c1-c6 的平均值计算得出，节点 n2 的值是边界值（不是控制体积 c1、c6、c7 的平均值），假设在此问题中边界值对变量有效。

图 27.1.1：计算节点值

Figure 27.1.1: Computing Node Values



!! 注意边界节点值对自定义流场函数无效。

在“面”上的节点值要用线性内插法以内插值网格节点数据替换。因为按“面”上的节点分区区域协调，所以值是等同的。对于等值面和等值线，其值由在等值分割的面上的网格节点替换。对于等值点，其值由控制体积包含的点的网格节点替换。

27.2 速率选择面板

以下是选择速率有效方法：

。笛卡尔速率：这些速率是基于几何学中的笛卡尔坐标系。选择笛卡尔速率，要分出 x 速率，y 速率，z 速率。这是最普通的速率选择类型。

。柱状速率：这些速率是基于下面各坐标系轴向的，径向的，切向的组合：

。对于以 x 轴为旋转轴的轴对称问题，x 方向为轴向，y 方向为径向。（如果模拟轴对称旋转，那旋转方向为切向。）

。对于包括一单个控制体积区域的 2D 问题，z 方向为轴向，它的原点指定在 Fluid panel。

。对于包括一单个控制体积区域的 3D 问题，坐标系规定为指定在 Fluid panel 的旋转轴和原点。

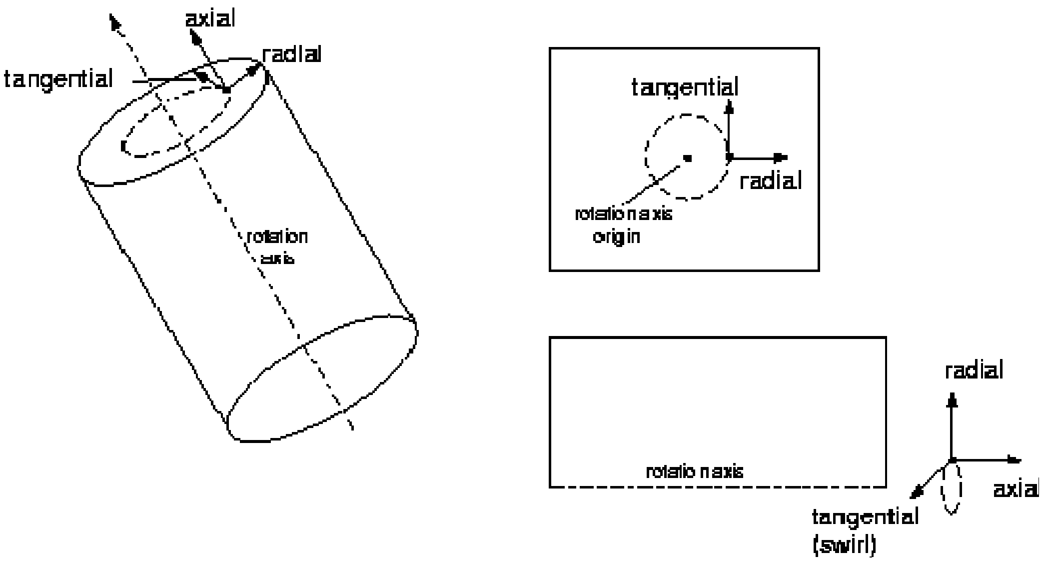
。包含多重区域的问题（例如：多重结构或滑动的网孔），坐标系规定为在 fluid(or solid)panel for the “reference zone”的旋转轴。参考区域是从参考值 panel 选取的，像如 26.8 节关于 2D 问题描述的那样，可指定唯一的轴端点，z 方向通常是轴向。

对于上述定义的所有柱状坐标系，正的径向速率是从旋转轴沿径向指向外，正的轴向速率是沿旋转轴向量方向，正的切向速率是基于旋转轴正向的右手法则规定。

为选择柱状速度，就要选定轴向速度，径向速度，等等。图 27.2.1 说明了在不同的区域各柱状速度：在 3D 问题中划分为轴向速度，径向速度和切向速度。在 2D 问题中则是径向速度和切向速度。在轴对称问题中划分为轴向速度和径向速度，当建模为旋转对称轴时也可选择旋转速度（等同于切向速度）。

图 27.2.1：在 3D,2D 和轴对称问题中柱状速度的组成

Figure 27.2.1: Cylindrical Velocity Components in 3D, 2D, and Axisymmetric Domains



。相对速度：这些速度以坐标系和移动的参考系为基础。当你用旋转坐标系统或混合平面或多重坐标系统或滑动网孔建模你的流体，他们是很有用的。（参看第 9 章关于在移动区域的流体建模。）为选择相对速度，需要选定相对 X 速度,相对 Y 速度，相对径向速度，等等。（注

意可以为笛卡尔和柱状速度各组分划分相对速度。）
如果用单一旋转坐标系，那相对速度值要考虑移动的参考系。如果用多重坐标系，或混合平面，或滑动网孔，需要在 Reference values panel（参看 26.8 节）中选择适当的控制体积作为参照区域从而指定出所求速度的相对体系。每个控制体积的旋转轴定义在与之关联的流体面板或固体面板。（参看 6.17.1 节或 6.18.1 节。）
注意如果问题中没有移动区域，那么相对速度和绝对速度是等同的。
注意相对速度也可用来计算滞流值（总压和总温），上述第二项中的柱状坐标系也可用来定义轴向坐标和径向坐标。

27.3 可流场变量列表

下面是对标记变量的规定，用于表 27.3.1-27.3.14：

2d	2D 情况下的流体
2da	2D 轴对称情况下的流体（有无旋转）
2dasw	2D 轴对称旋转流体
3d	3D 流体
bnv	边界处的网格节点值
cpl	available only in the coupled solvers
cv	控制体积值（节点值面板关闭）
dil	not available with full multicomponent diffusion
do	当离散纵向辐射模型启用
dpm	联结的分散相的计算
dtrm	当离散转移辐射模型启用
e	能量计算
edc	用于湍流化学交互作用的 EDC 模型
emm	当欧拉多相模型启用
ewt	增强的间隔层处理
gran	粒状阶段
h2o	含水的混合剂
id	理想气体定律用于密度
ke	当一个 k-e 湍流模型启用
kw	当一个 k-w 湍流模型启用
les	当 LES 湍流模型启用
mix	当多相混合模型启用
melt	当熔融凝固模型启用
mp	多相模型
nox	NOX 计算
np	not available in parallel solvers
nv	采用显节点值函数
p	在平行解算器中
pl	当 P-1 辐射模型启用
pdf	不预混和燃烧计算
pmx	预混和燃烧计算
ppmx	部分预混和燃烧计算
r	当罗斯兰辐射模型启用
rad	辐射热转移计算

rc 有限率反映
rsm 当雷诺应力湍流模型启用
s2s 地对地辐射模型启用
sa Spalart-Allmaras 湍流模型启用
seg 在隔离解算器中
sp 种类计算
sr 表面反应
soot 烟灰计算
stat 不稳定统计的数据取样
stcm 刚性化学计算
t 湍流
turbo 一个涡轮机的局部解剖
udm 当一个用户定义存储启用
uds 当一个用户定义标量启用
v 粘性流体

Table 27.3.1: Pressure and **Density** Categories

Category	**Variable**
Pressure...	**Static Pressure** (*bnv*, *nv*)
	Pressure Coefficient
	Dynamic Pressure
	Absolute Pressure (*bnv*, *nv*)
	Total Pressure (*bnv*, *nv*)
	Relative Total Pressure
Density...	**Density**
	Density of phase-n (*mp*)
	Density All

表 27.3.1：压强和密度列表

类别	变量
压强	静态压强（bnv,nv）
	压强系数
	动态压强
	绝对压强（bnv,nv）
	总压强（bnv,nv）
	相对总压强
密度	密度
	n 相密度（mp）
	全部密度

Table 27.3.2: Velocity Category 表 27.3.2：速度列表	
Category 种类	**Variable** 变量
Velocity...速度	**Velocity Magnitude** (*bnv*, *nv*)速度大小
	X Velocity (*bnv*, *nv*)X 速度
	Y Velocity (*bnv*, *nv*)Y 速度
	Z Velocity (*3d*, *bnv*, *nv*)Z 速度
	Swirl Velocity (*2dasw*, *bnv*, *nv*)旋转速度
	Axial Velocity (*2da* or *3d*)轴向速度
	Radial Velocity 径向速度
	Stream Function (*2d*, *nv*)流量函数
	Tangential Velocity 切向速度
	Mach Number (*id*)马赫数
	Relative Velocity Magnitude (*bnv*, *nv*)相对速度大小
	Relative X Velocity (*bnv*, *nv*)相对 X 速度
	Relative Y Velocity (*bnv*, *nv*)相对 Y 速度
	Relative Z Velocity (*3d*, *bnv*, *nv*)相对 Z 速度
	Relative Axial Velocity (*2da*)相对轴向速度
	Relative Radial Velocity (*2da*)相对径向速度
	Relative Swirl Velocity (*2dasw*, *bnv*, *nv*)相对旋转速度
	Relative Tangential Velocity (*2d* or *3d*)相对切向速度
	Relative Mach Number (*id*)相对马赫数
	Grid X-Velocity (*nv*)网格 X 速度
	Grid Y-Velocity (*nv*)网格 Y 速度
	Grid Z-Velocity (*3d*, *nv*)网格 Z 速度
	Velocity Angle 速度角度
	Relative Velocity Angle 相对速度角度
	Vorticity Magnitude (*v*)涡流强度大小
	Helicity (*v*, *3d*)螺旋性
	X-Vorticity (*v*, *3d*)X 涡度
	Y-Vorticity (*v*, *3d*)Y 涡度

	Z-Vorticity (*v*, *3d*)Z 涡度
	Cell Reynolds Number (*v*)控制体积雷诺数
	Preconditioning Reference Velocity (*cpl*)预处理参考速度

Table 27.3.3: Velocity Category (Multiphase-Specific Variables)
表 27.3.3：速度列表（特殊多相变量）

Category 类别	**Variable** 变量
Velocity...速度	**phase-n Velocity Magnitude** (*mp*)n 相速度大小
	phase-n X Velocity (*mp*)n 相 X 速度
	phase-n Y Velocity (*mp*)n 相 Y 速度
	phase-n Z Velocity (*3d*, *mp*)n 相 Z 速度
	phase-n Axial Velocity (*2da* or *3d*; *mp*)n 相轴向速度
	phase-n Radial Velocity (*mp*)n 相径向速度
	phase-n Swirl Velocity (*2dasw*, *mp*, *bnv*, *nv*)n 相旋转速度
	phase-n Stream Function (*2d*, *mp*, *nv*)n 相流量函数

Table 27.3.4: Temperature, **Radiation**, and **Solidification/Melting** Categories
表 27.3.4：温度，辐射，凝固/熔融的列表

Category 类别	**Variable** 变量
Temperature...温度	**Static Temperature** (*e*, *nv*)静态温度
	Total Temperature (*e*, *bnv*, *nv*)总温度
	Enthalpy (*e*, *nv*)焓
	Enthalpy of phase-n (*e*, *nv*, *mp*)n 相的焓
	Total Enthalpy of phase-n (*e*, *nv*, *mp*)n 相的总焓
	Total Enthalpy Deviation of phase-n (*e*, *nv*, *mp*)n 相总焓偏差
	Total Energy of phase-n (*e*, *nv*, *mp*)n 相总能量
	Relative Total Temperature (*e*)相对总温度
	Rothalpy (*e*, *nv*)
	Fine Scale Temperature (*edc*, *nv*)精密标度温度

	Wall Temperature (Outer Surface) (*e*, *v*, *cv*)间隔层温度（外表面）
	Wall Temperature (Inner Surface) (*e*, *v*, *cv*)间隔层温度（内表面）
	Total Enthalpy (*e*)总焓
	Total Enthalpy Deviation (*e*)总焓偏差
	Entropy (*e*)熵
	Total Energy (*e*)总能量
	Internal Energy (*e*)内能
Radiation...辐射	**Absorption Coefficient** (*r*, *p1*, *do*, or *dtrm*)吸收系数
	Scattering Coefficient (*r*, *p1*, or *do*)散射系数
	Refractive Index (*do*)折射率
	Radiation Temperature (*p1* or *do*)辐射温度
	Incident Radiation (*p1* or *do*)入射辐射
	Incident Radiation (Band n) (*do* (non-gray))入射辐射（n 段）
	Surface Cluster ID (*s2s*)表面 cluster ID
Solidification/凝固	**Liquid Fraction** (*melt*)流体部分
Melting...熔融	**Contact Resistivity** (*melt*)触点阻力
	X Pull Velocity (*melt* (if calculated))X 牵引速度
	Y Pull Velocity (*melt* (if calculated))Y 牵引速度
	Z Pull Velocity (*melt* (if calculated), *3d*)Z 牵引速度
	Axial Pull Velocity (*melt* (if calculated), *2da*)轴向牵引速度
	Radial Pull Velocity (*melt* (if calculated), *2da*)径向牵引速度
	Swirl Pull Velocity (*melt* (if calculated), *2dasw*)旋转牵引速度

Table 27.3.5: Turbulence Category 表 27.3.5：湍流列表

Category 类别	**Variable 变量**
Turbulence...湍流	**Turbulent Kinetic Energy (k)** (*ke*, *kw*, or *rsm*; *bnv*, *nv*)湍流动能
	phase-n Turbulent Kinetic Energy (*ke*, *emm*)n 相湍流动能
	UU Reynolds Stress (*rsm*)UU 雷诺应力

	VV Reynolds Stress (*rsm*)VV 雷诺应力
	WW Reynolds Stress (*rsm*)WW 雷诺应力
	UV Reynolds Stress (*rsm*)UV 雷诺应力
	UW Reynolds Stress (*rsm*, *3d*)UW 雷诺应力
	VW Reynolds Stress (*rsm*, *3d*)VW 雷诺应力
	Turbulence Intensity (*ke*, *kw*, or *rsm*)湍流强度
	Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (*ke* or *rsm*; *bnv*, *nv*)湍流逸散率
	phase-n Turbulent Dissipation Rate (*ke*, *emm*)n 相湍流逸散率
	Specific Dissipation Rate (Omega) (*kw*)特殊逸散率
	Production of k (*ke*, *kw*, or *rsm*)k 制造
	phase-n Production of k (*ke*, *emm*)n 相 k 制造
	Modified Turbulent Viscosity (*sa*)修正湍流粘度
	Turbulent Viscosity (*t*)湍流粘度
	phase-n Turbulent Viscosity (*t*, *emm*)n 相湍流粘度
	Effective Viscosity (*t*)有效粘度
	Turbulent Viscosity Ratio (*ke*, *kw*, *rsm*, or *sa*)湍流粘度比
	Subgrid Turbulent Kinetic Energy (*les*)次网格湍流动能
	Subgrid Turbulent Viscosity (*les*)次网格湍流粘度
	Subgrid Effective Viscosity (*les*)次网格有效粘度
	Subgrid Turbulent Viscosity Ratio (*les*)次网格湍流粘度比
	Effective Thermal Conductivity (*t*, *e*)有效导热性
	Effective Prandtl Number (*t*, *e*)有效普朗特数
	Wall Ystar (*ke*, *kw*, or *rsm*; *cv*)间隔层 Y 星型
	Wall Yplus (*t*, *cv*)间隔层 Y 正型
	phase-n Wall Yplus (*t*, *cv*, *emm*)n 相间隔层 Y 正型
	Turbulent Reynolds Number (Re_y) (*ke* or *rsm*; *ewt*)湍流雷诺数

Table 27.3.6: Species, **Reactions**, **Pdf**, and **Premixed Combustion** Categories
表 27.3.6：物种，反应，pdf,预混和燃烧的列表

Category 类别	**Variable** 变量
Species...物种	**Mass fraction of species-n** (*sp*, *pdf*, or *ppmx*; *nv*)n 种质量分率
	Mole fraction of species-n (*sp*, *pdf*, or *ppmx*)n 种摩尔分数
	Concentration of species-n (*sp*, *pdf*, or *ppmx*)n 种浓度
	Lam Diff Coef of species-n (*sp*, *dil*)n 种 **Lam Diff** 系数
	Eff Diff Coef of species-n (*t*, *sp*, *dil*)n 种 **Eff Diff** 系数
	Thermal Diff Coef of species-n (*sp*)n 种热量 Diff 系数
	Enthalpy of species-n (*sp*)n 种焓
	species-n Source Term (*rc*, *cpl*)n 种 **Source Term**
	Surface Deposition Rate of species-n (*sr*)n 种表面沉积率
	Relative Humidity (*sp*, *pdf*, or *ppmx*; *h2o*)相对湿度
	Time Step Scale (*sp*, *stcm*)
	Fine Scale Mass fraction of species-n (*edc*)n 种精密标度质量分率
	Fine Scale Transfer Rate (*edc*)精密标度传输率
	1-Fine Scale Volume Fraction (*edc*)精密标度体积分率
Reactions...反应	**Rate of Reaction-n** (*rc*)n 反应速度
	Arrhenius Rate of Reaction-n (*rc*)n 反应阿伦纽斯速度
	Turbulent Rate of Reaction-n (*rc*, *t*)n 反应湍流速度
Pdf...	**Mean Mixture Fraction** (*pdf* or *ppmx*; *nv*)平均混合分数
	Secondary Mean Mixture Fraction (*pdf* or *ppmx*; *nv*)二级平均混合分数
	Mixture Fraction Variance (*pdf* or *ppmx*; *nv*)平均混合分数变量
	Secondary Mixture Fraction Variance (*pdf* or *ppmx*; *nv*)二级平均混合分数变量
	Fvar Prod (*pdf* or *ppmx*)fvar 测试棒
	Fvar2 Prod (*pdf* or *ppmx*)fvar2 测试棒
	Scalar Dissipation (*pdf* or *ppmx*)标量逸散
Premixed 预混和	**Progress Variable** (*pmx* or *ppmx*; *nv*)进展变量
Combustion... 燃烧	**Damkohler Number** (*pmx* or *ppmx*)

	Stretch Factor (*pmx* or *ppmx*)伸长因数
	Turbulent Flame Speed (*pmx* or *ppmx*)湍流焰速度
	Static Temperature (*pmx* or *ppmx*)静态温度
	Product Formation Rate (*pmx* or *ppmx*)生成物形成率
	Laminar Flame Speed (*pmx* or *ppmx*)层流焰速度
	Critical Strain Rate (*pmx* or *ppmx*)临界应变率
	Adiabatic Flame Temperature (*pmx* or *ppmx*)绝热火焰温度
	Unburnt Fuel Mass Fraction (*pmx* or *ppmx*)未燃烧燃料质量分率

Table 27.3.7: NOx, **Soot**, and **Unsteady Statistics** Categories
表 27.3.7：Nox，烟灰和不稳定统计列表

Category 类别	**Variable** 变量
NOx...	**Mass fraction of NO** (*nox*)NO 质量分率
	Mass fraction of HCN (*nox*)HCN 质量分率
	Mass fraction of NH3 (*nox*)NH3 质量分率
	Mole fraction of NO (*nox*)NO 摩尔分率
	Mole fraction of HCN (*nox*)HCN 摩尔分率
	Mole fraction of NH3 (*nox*)NH3 摩尔分率
	Concentration of NO (*nox*)NO 浓度
	Concentration of HCN (*nox*)HCN 浓度
	Concentration of NH3 (*nox*)NH3 浓度
	Variance of Temperature (*nox*)温度变量
	Variance of Species (*nox*)物种变量
	Variance of Species 1 (*nox*)物种 1 变量
	Variance of Species 2 (*nox*)物种 2 变量
Soot...烟灰	**Mass fraction of soot** (*soot*)烟灰质量分率
	Mass fraction of nuclei (*soot*)核的质量分率
Unsteady Statistics...不稳定统计	**Mean quantity-n** (*stat*)平均值 n
	RMS quantity-n (*stat*)均方根值 n

Table 27.3.8: Phases, **Discrete Phase Model**, **Granular Pressure**, and **Granular Temperature** Categories
表 27.3.8：相，分散相模型，颗粒压强，和颗粒温度列表

Category 类别	**Variable** 变量
Phases...相	**Volume fraction of phase-n** (*mp*)n 相体积分率
Discrete Phase Model...分散相模型	**DPM Mass Source** (*dpm*)质量源
	DPM Erosion (*dpm*, *cv*)腐蚀
	DPM Accretion (*dpm*, *cv*)增长
	DPM X Momentum Source (*dpm*)X 动量源
	DPM Y Momentum Source (*dpm*)Y 动量源
	DPM Z Momentum Source (*dpm*, *3d*)Z 动量源
	DPM Swirl Momentum Source (*dpm*, *2dasw*)旋转动量源
	DPM Sensible Enthalpy Source (*dpm*, *e*)显焓源
	DPM Enthalpy Source (*dpm*, *e*)焓源
	DPM Absorption Coefficient (*dpm*, *rad*)吸收系数
	DPM Emission (*dpm*, *rad*)发散
	DPM Scattering (*dpm*, *rad*)散射
	DPM Burnout (*dpm*, *sp*, *e*)燃尽
	DPM Evaporation/Devolatilization (*dpm*, *sp*, *e*)蒸发/液化
	DPM Concentration (*dpm*)浓度
	DPM species-n Source (*dpm*, *sp*, *e*)n 种源
Granular Pressure...颗粒压强	**phase-n Granular Pressure** (*emm*, *gran*)n 相颗粒压强
Granular Temperature...颗粒温	**phase-n Granular Temperature** (*emm*, *gran*)n 相颗粒温

度	度

Table 27.3.9: Properties, **Wall Fluxes**, **User Defined Scalars**, and **User Defined Memory** Categories
表 27.3.9：性质，间隔层通量，用户定义标量和用户定义存储列表

Category 类别	**Variable** 变量
Properties...性质	**Molecular Viscosity** (*v*)分子粘度
	Molecular Viscosity of phase-n (*v*, *mp*)n 相分子粘度
	Diameter of phase-n (*mix* or *emm*)n 相直径
	Thermal Conductivity (*e*, *v*)导热性
	Specific Heat (Cp) (*e*)比热
	Specific Heat Ratio (gamma) (*id*)比热比
	Gas Constant (R) (*id*)气体常数
	Molecular Prandtl Number (*e*, *v*)分子普朗特数
	Mean Molecular Weight (*seg*, *pdf*)平均分子量
	Sound Speed (*id*)声速
Wall Fluxes...间隔层通量	**Wall Shear Stress** (*v*, *cv*)间隔层剪应力
	phase-n Wall Shear Stress (*v*, *cv*, *emm*)n 相间隔层剪应力
	X-Wall Shear Stress (*v*, *cv*)X 剪应力
	Y-Wall Shear Stress (*v*, *cv*)Y 剪应力
	Z-Wall Shear Stress (*v*, *3d*, *cv*)Z 剪应力
	phase-n X-Wall Shear Stress (*v*, *cv*, *emm*)n 相 X 剪应力
	phase-n Y-Wall Shear Stress (*v*, *cv*, *emm*)n 相 Y 剪应力
	phase-n Z-Wall Shear Stress (*v*, *3d*, *cv*, *emm*)n 相 Z 剪应力
	Axial-Wall Shear Stress (*2da*, *cv*)轴向剪应力

	Radial-Wall Shear Stress (*2da*, *cv*)径向剪应力
	Swirl-Wall Shear Stress (*2dasw*, *cv*)旋向剪应力
	Skin Friction Coefficient (*v*, *cv*)表面摩擦系数
	phase-n Skin Friction Coefficient (*v*, *cv*, *emm*)n 相表面摩擦系数
	Total Surface Heat Flux (*e*, *v*, *cv*)总表面热负荷
	Radiation Heat Flux (*rad*, *cv*)辐射热负荷
	Surface Incident Radiation (*do*, *cv*)表面入射辐射
	Surface Heat Transfer Coef. (*e*, *v*, *cv*)表面传热系数
	Surface Nusselt Number (*e*, *v*, *cv*)表面努珊数
	Surface Stanton Number (*e*, *v*, *cv*)表面斯坦顿数
User Defined Scalars...用户定义标量	**Scalar-n** (*uds*, *nv*)n 标量
	Diffusion Coef. of Scalar-n (*uds*)n 标量扩散系数
User Defined Memory...用户定义存储	**udm-n** (*udm*)

Table 27.3.10: Cell Info, **Grid**, and **Adaption** Categories 表 27.3.10：控制体积，网络节点，配合列表

Category 类别	**Variable** 变量
Cell Info...控制体积	**Cell Partition** (*np*)控制体积分区
	Active Cell Partition (*p*)主动控制体积分区
	Stored Cell Partition (*p*)存储控制体积分区
	Cell Id (*p*)控制体积标识
	Cell Element Type 控制体积要素种类
	Cell Zone Type 控制体积区域种类
	Cell Zone Index 控制体积区域指数

	Partition Neighbors 邻元素分区
Grid...网格节点	**X-Coordinate** (*nv*)X 坐标
	Y-Coordinate (*nv*)Y 坐标
	Z-Coordinate (*3d*, *nv*)Z 坐标
	Axial Coordinate (*nv*)轴向坐标
	Radial Coordinate (*nv*)径向坐标
	X Surface AreaX 表面面积
	Y Surface AreaY 表面面积
	Z Surface Area (*3d*)Z 表面面积
	X Face AreaX 端面面积
	Y Face AreaY 端面面积
	Z Face Area (*3d*)Z 端面面积
	Cell Equiangle Skew 控制体积等角度倾斜
	Cell Equivolume Skew 控制体积等量倾斜
	Cell Volume 控制体积容量
	2D Cell Volume (*2da*)2D 控制体积容量
	Cell Wall Distance 控制体积间隔层距离
	Face Handedness 端面旋向性
	Face Squish Index 端面挤压指数
	Cell Squish Index 控制体积挤压指数

Table 27.3.11: Grid Category (Turbomachinery-Specific Variables) and **Adaption** Category
表 27.3.11：网络节点列表（涡轮积类变量）和配合列表

Category 类别	**Variable** 变量
Grid...网络节点	**Meridional Coordinate** (*nv*, *turbo*)经纬坐标
	Abs Meridional Coordinate (*nv*, *turbo*)绝对值经纬坐标

	Spanwise Coordinate (*nv*, *turbo*)
	Abs (H-C) Spanwise Coordinate (*nv*, *turbo*)
	Abs (C-H) Spanwise Coordinate (*nv*, *turbo*)
	Pitchwise Coordinate (*nv*, *turbo*)
	Abs Pitchwise Coordinate (*nv*, *turbo*)
Adaption...配合	**Adaption Function** 配合功能
	Existing Value 现存值
	Boundary Cell Distance 控制体积边界距离
	Boundary Normal Distance 边界标准距离
	Boundary Volume Distance (*np*)边界容量距离
	Cell Volume Change 控制体积容积变化
	Cell Equiangle Skew 控制体积等角度倾斜
	Cell Equivolume Skew 控制体积等容量倾斜
	Cell Surface Area 控制体积表面面积
	Cell Warpage 控制体积折曲
	Cell Children
	Cell Refine Level

Table 27.3.12: Residuals Category 表 27.3.12：残值列表

Category 类别	**Variable** 变量
Residuals...残值	**Mass Imbalance** 质量不稳定
	Pressure Residual (*cpl*)压强残值
	X-Velocity Residual (*cpl*; *2d* or *3d*)X 速度残值
	Y-Velocity Residual (*cpl*; *2d* or *3d*)Y 速度残值
	Z-Velocity Residual (*cpl*, *3d*)Z 速度残值

	Axial-Velocity Residual (*cpl*, *2da*)轴向速度残值
	Radial-Velocity Residual (*cpl*, *2da*)径向速度残值
	Swirl-Velocity Residual (*cpl*, *2dasw*)旋向速度残值
	Temperature Residual (*cpl*, *e*)温度残值
	Species-n Residual (*cpl*, *sp*)n 物种残值

Table 27.3.13: Derivatives Category 表 27.3.13：导数列表

Category 类别	**Variable** 变量
Derivatives...导数	**Strain Rate** (*v*)应变速率
	dX-Velocity/dx
	dY-Velocity/dx
	dZ-Velocity/dx (*3d*)
	dAxial-Velocity/dx (*2da*)
	dRadial-Velocity/dx (*2da*)
	dSwirl-Velocity/dx (*2dasw*)
	d species-n/dx (*cpl*, *sp*)
	dX-Velocity/dy
	dY-Velocity/dy
	dZ-Velocity/dy (*3d*)
	dAxial-Velocity/dy (*2da*)
	dRadial-Velocity/dy (*2da*)
	dSwirl-Velocity/dy (*2dasw*)
	d species-n/dy (*cpl*, *sp*)
	dX-Velocity/dz (*3d*)
	dY-Velocity/dz (*3d*)

	dZ-Velocity/dz (*3d*)
	d species-n/dz (*cpl*, *sp*, *3d*)
	dOmega/dx (*2dasw*)
	dOmega/dy (*2dasw*)
	dp-dX (*seg*)
	dp-dY (*seg*)
	dp-dZ (*seg*, *3d*)

Table 27.3.14: Derivatives Category (Multiphase-Specific Variables)表 27.3.14：导数列表（多相特殊变量）

Category 类别	**Variable** 变量
Derivatives...导数	**Strain Rate of phase-n** (*v*, *emm*)n 相应变速率
	phase-n dX-Velocity/dX (*v*, *emm*)
	phase-n dY-Velocity/dX (*v*, *emm*)
	phase-n dZ-Velocity/dX (*v*, *emm*, *3d*)
	phase-n dAxial-Velocity/dX (*v*, *emm*, *2da*)
	phase-n dRadial-Velocity/dX (*v*, *emm*, *2da*)
	phase-n dX-Velocity/dY (*v*, *emm*)
	phase-n dY-Velocity/dY (*v*, *emm*)
	phase-n dZ-Velocity/dY (*v*, *emm*, *3d*)
	phase-n dAxial-Velocity/dY (*v*, *emm*, *2da*)
	phase-n dRadial-Velocity/dY (*v*, *emm*, *2da*)
	phase-n dX-Velocity/dZ (*v*, *emm*, *3d*)
	phase-n dY-Velocity/dZ (*v*, *emm*, *3d*)
	phase-n dZ-Velocity/dZ (*v*, *emm*, *3d*)
	phase-n Granular Pressure G 0 cmpn (*emm*, *gran*)

	phase-n Granular Pressure G 1 cmpn (*emm*, *gran*)
	phase-n Granular Pressure G 2 cmpn (*emm*, *gran*, *3d*)

27.4 流场变量（按阿拉伯字母顺序）列表及其定义

下面，在表 27.3.1-27.3.14 列出的变量被定义。一些变量（诸如残值）会在范畴名称下赋予一个一般的定义，变量在其范畴下并不个别列出。适当的时候，当它在装置单位面板的数量列表中出现时，单位量被包括。

Abs(C-H)Spanwise 坐标

（在网络节点范畴下）是空间坐标在 spanwise 方向，从 casing 到中枢。单位量是长度。

Abs(H-C)Spanwise 坐标

（在网络节点范畴下）是空间坐标在 spanwise 方向，从中枢到 casing。单位量是长度。

Abs 经纬坐标

（在网络节点范畴下）是沿着流迹从入口到出口的空间坐标。单位量是长度。

Abs Pitchwise 坐标

（在网络节点范畴下）是在圆周（Pitchwise）方向的空间坐标。单位量是角度。

绝对压强

（在压强范畴下）等于工作压强加上标准压强。参看 7.12 节。单位量是压强。

吸收系数

（在辐射范畴下）描述了媒介的性质，是描述在媒介中每单位波程长度吸收辐射热的量。它可反过来解释为一个光子在被吸收前走过的平均路径（如果吸收系数沿路径并不变化）。吸收系数的单位量是反向长度。

主动控制体积分区

（在控制体积范畴下）是一个整体鉴别器指出一个精确的控制体积所从属的分区。网络节点被分为若干区利用 fluent 的并行型式多重处理器来解决问题，分区的 ID 可用来确定不同控制体积群的范围。当保存文件时，主动控制体积分区用于当前的计算，同时存储的控制体积分区（最后执行的分区）被使用。详细信息参看 28.4.3 节。

配合

包括一般的流场变量用于配合节点。关于解决配合的信息，参看 23 章。

配合功能

（在配合范畴下）是在临时控制体积存储未分配的值的拉普拉斯算子。例如，为显示压强的拉普拉斯算子等值线，必须选择静态压强，单击计算（或显示）按钮，选择配合功能，最后单击显示按钮。

隔热火焰温度

（在预混和燃烧范畴下）是燃烧产物在层状预混合焰的隔热温度（等式 15.2-21 中的 Tb）。单位量是温度。

N 反应的阿伦纽斯率

（在反应范畴下）如下列表达式（如下变量的定义参看等式 13.1-7）

$$\hat{R}_r = \Gamma\left(k_{f,r}\prod_{j=1}^{N_r}[C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r}\prod_{j=1}^{N_r}[C_{j,r}]^{\eta''_{j,r}}\right)$$

所选值不受具体物种限制，单位是 kgmol/m^3-s。

要找出关于给定物种 i 对应的反应 r 的生产/破坏率，将反应 r 的所选反应率乘以条件 $M_i(v''_{i,r}-v'_{i,r})$，M_i 代表物种 i 的分子量，$v''_{i,r}$ 和 $v'_{i,r}$ 是物种 i 在反应 r 中的分子当量系数。

轴向坐标

（在网格节点范畴下）是在轴向方向从远点出发的距离。在流体或固体面板中每个控制体积区域轴的原点和（在 3D）方向都被定义。一个 2D 模型的轴向方向通常是 Z 方向，一个 2D 轴对称模型的轴向方向通常是 X 方向。轴坐标的单位量是长度。

轴向牵引速度

（在凝固和熔融范畴）是在连续铸件加工操作的固体材料的牵引速度的轴向组分。单位量是速度。

轴向速度

（在速度范畴下）是在轴向的速度组分。（参看 27.2）单位量是速度。

第 n 相轴相速率

（在速率范畴内）是第 n 相的轴相速率的组成部分。（相名称为第 n 相），单位量为速率。

轴向壁剪切力

（属于壁函数范畴）是沿切线作用于表面而产生摩擦的力的轴向部分。单位量是压强。

控制体积边界距离

（属于配合范畴）是说明一个边界区域的控制体积大约数量。

标准边界距离

（属于配合范畴）是最近的边界区域到控制体积质心的距离。

容量边界距离

（属于配合范畴）是定义在边界配合面板的基于边界容量，放大因子，标准距离并同所选的边界区域区分的控制体积容量。

子控制体积

（属于配合范畴）是区分控制体积是否是在 hanging-node 配合过程细分的控制体积的产物（value=1）或（value=0）的二元标识。

控制体积元素种类

（属于控制体积信息范畴）是整体控制体积元素种类的标识数量。每个控制体积都有一个下面的元素种类：

三角形	1
四面体	2
四边形	3
六面体	4
棱锥	5
楔形	6

控制体积等角度倾斜

（属于网格和配合范畴）是一种用规范角度偏差方法的无因次参数计算，定义为

$$\max\left[\frac{q_{\max}-q_e}{180-q_e}, \frac{q_e-q_{\min}}{q_e}\right] \tag{27.4.1}$$

在这里 q_{max}=控制面或体积中最大的角度

q_{min}=控制面或体积中最小的角度

q_e =等角的控制面或体积中的角度（例如三角形 60 和正方形 90）

值为 0 说明是一个最好的等角控制体积，值为 1 说明是一个完全简化的控制体积。简化控制体积（条片）的特点是节点几乎共面（在 2D 共线）。控制体积等角度倾斜适用于所有元素。

控制体积等容量倾斜

（属于网格和配合范畴）是一种用容量偏差方法的无因次参数计算，定义为

$$\frac{\text{optimal-cell-size} - \text{cell-size}}{\text{optimal-cell-size}} \quad (27.4.2)$$

在这里最佳控制体积尺寸是一个有相同外接圆半径的等边控制体积的尺寸。值为 0 说明是一个最佳等边控制体积，值为 1 说明是一个完全简化控制体积。简化控制体积（条片）的特点是节点几乎共面（在 2D 共线）。控制体积等容量倾斜仅仅适用于三角形和四面体元素。

控制体积 ID

(在控制体积信息范畴)是一个联系每个控制体积的唯一的整体标识。

控制体积信息

包括了识别控制体积和与其它控制体积关联的量值。

控制体积分区

（属于控制体积信息范畴）是一个指明分区属于哪个具体控制体积的整体标识。在这个问题中利用 fluent 的平行型式由多重处理器将网格节点分成了若干分区，分区的标识可用来确定各种控制体积群的范围。

控制体积细化水平

（属于配合范畴）是说明控制体积与原始网格比较在 hanging 节点配合过程中被细分的次数。例如，如果一个四元控制体积列成四块，那么这四个新的体积每个的控制体积细化水平是 1。如果这四个体积再次分裂，那么产生的 16 个体积每个控制体积细化水平是 2。

控制体积雷诺数

（属于速度范畴）是在一个控制体积内的雷诺数值。（雷诺数是惯性力同粘性力的比值，是一个无因次参数。）控制体积雷诺数定义为

$$\text{Re} \equiv \frac{\rho u d}{\mu} \quad (27.4.3)$$

在这里 ρ 是密度，u 是速度大小，μ 是有效粘性（层流加上湍流），d 是 2D 情况下控制体积容量 $^{1/2}$ 是 3D 情况下控制体积容量 $^{1/3}$ 或者轴对称情况。

控制体积挤压指数

（属于网络节点范畴）是网孔性质的测量标准，是每个从控制体积质心指向每个面心的矢量的点产物计算得来，相关面的面积矢量是

$$\max_i \left[1 - \frac{\vec{A}_i \cdot \vec{r}_{c0/xf_i}}{|\vec{A}_i||\vec{r}_{c0/xf_i}|} \right] \quad (27.4.4)$$

因此，最差的控制体积的挤压指数接近 1。

控制体积表面面积

（属于配合范畴）是控制体积总的表面面积，是组成控制体积的所有面的面积的总和。

控制体积容量

(属于节点范畴)是控制体积的容量。在 2D 中这个容量是控制体积面积乘以单元深度。轴对称情况中控制体积容量是用一弧度参考深度来计算。控制体积容量的单位量是容量。

2D 控制体积容量

（属于节点范畴）是在轴对称计算中二维的控制体积容量。在轴对称计算中，2D 控制体积容量是以半径为尺度。单位量是面积。

控制体积容量变化

（属于配合范畴）是当前控制体积和它的邻域的最大体积比率。

控制体积壁距离

（属于节点范畴）是每个控制体积质心到壁边界的标准距离的分布。单位量是长度。

控制体积折曲

（属于配合范畴）是控制体积质心到控制体积外心的距离和外心半径的比值的平方根。

$$\text{warpage} = \sqrt{\frac{\left|\vec{r}_{\text{centroid}} - \vec{r}_{\text{circumcenter}}\right|}{R_{\text{circumcenter}}}} \qquad (27.4.5)$$

控制体积区域指数

（属于控制体积信息范畴）是整体控制体积区域的识别数。问题中会有不止一个控制体积区域，所以控制体积区域 ID 可以用来识别各种控制体积群。

控制体积区域种类

（属于控制体积信息范畴）是整体控制体积区域种类 ID。一个流体控制体积的种类 ID 是 1，一个固体控制体积种类 ID 是 17，一个表面控制体积（平行处理器）的种类 ID 是 21。

物种 n 的浓度

（属于物种范畴）是一个物种每单位容量的质量。单位量是密度。

HCN 浓度，NH3 浓度，NO 浓度

（属于 NO_x 范畴）是每单位容量 HCN，NH3，NO 的质量。单位量是密度。如果你建模燃料 NO_x，仅仅出现 HCN 的浓度和 NH3 的浓度。参看 17.1.5 节。

相关阻力系数

（属于凝固/熔融范畴）在壁上的额外阻力会产生相关阻力系数。它等于

$$R_c(1-\beta)/h$$

在这里，R_c 表示相关阻力系数，β 液体分数，h 表示壁邻控制体积高度。相关阻力系数单位量是热阻。

临界应变率

(属于预混和燃烧范畴)是用来说明预混合焰的延伸消灭的一个参数（15.2-13 等式中的 g_{cr}）。单位量是逆时间。

自定义流场函数

是你定义的纯流场函数。你可以用自定义流场函数计算面板来建立一个自定义函数。所有定义的流场函数会列到下级下拉列表。参看 27.5。

Damkohler 数

（属于预混和燃烧范畴）是定义为湍流与化学时间量的比值的一个无因次参数。

密度

包括与密度相关的变量。

密度

（属于密度范畴）是每单位容量流体的质量。密度的划分或选择仅仅包括流体控制体积区域。单位量是密度。

整体密度
（属于密度范畴）是每单位容量流体或固体材料的质量。整体密度的划分或选择包括流体和固体控制体积区域。单位量是密度。
N 相密度
（属于密度范畴）是每单位容量第 n 相的质量。单位量是密度。
导数
是粘性导数。例如，dX-Velocity/dx 是速度在坐标系 x 方向的 x 组分的一阶导数。你可以在隔离处理器中计算速度，角速度，压强的一阶导数，在耦合处理器中计算速度，角速度，温度，物种的一阶导数。
N 相直径
（属于性质范畴）是二级 n 相的粒子，液滴，气泡的直径。单位量是长度。
第 n 标量的扩散系数
（属于用户定义标量范畴）是第 n 用户定义标量的迁移方程中的扩散系数。参看单独的 UDF 手册关于用户定义标量的介绍。
离散相模型...
包括与离散相模型有关的数量。 关于这模型的细节参见章19。
DPM吸收系数
(属于离散相模型范畴)是包括辐射(a方程11.3-1)的离散相计算的吸收系数。 其单元数量是逆长度。
DPM增长
(属于离散相模型范畴)是在壁边界计算的增长率：

$$R_{\text{accretion}} = \sum_{p=1}^{N} \frac{\dot{m}_p}{A_{\text{face}}} \tag{27.4.6}$$

在这里，m_p 是粒子流质量流速，A_{face} 是粒子撞击边界的壁面面积。仅当选择腐蚀/增长模型激活这个条件出现。参看 19.7.6。DPM 增长的单位量是质量通量。
DPM 燃尽
(属于离散相模型范畴)是从离散到连续相根据燃烧定律(定律5)来交换质量，并且与固体相反应率成正比。 燃尽交换单位是质量通量。
DPM浓度
(属于离散相模型范畴)是离散相的总浓度。 单位量是密度。
DPM放射
(属于离散相模型范畴)是每单位容量离散相微粒放射的辐射的量。 单位量是热生成率。
DPM焓源
(属于离散相模型范畴)是从离散相到连续相的交换焓(显焓加上热形成)。当微粒在连续相是一个热源时，交换是正的。 DPM焓源的单位量是功率。
DPM腐蚀
(属于离散相模型范畴)是在壁边界面处计算的腐蚀率：

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N} \frac{\dot{m}_p f(\alpha)}{A_{\text{face}}} \tag{27.4.7}$$

在这里，m_p 粒子流的质量流速， α 是粒子流路径与壁表面的碰撞角度，f(α)是壁面板指定的函数，A_{face} 是粒子撞击边界的壁面的面积。仅当选择腐蚀/增长模型激活这个条件出现。参看 19.7.6。DPM 腐蚀的单位量是质量通量。

DPM蒸发作用与液化作用
(属于离散相模型范畴)是由于熔滴微粒蒸发或者燃烧微粒液化，从离散相到蒸发或者液化的物种产生的质量交换。 如果你不使用非预混合的燃烧模型，每一单独的物种(下面的DPM物种n来源)的质量源也是有效的； 对于非预混合燃烧，仅仅这总和是有效的。DPM蒸发作用与液化作用的单位量是质量通量。
DPM质量源
(属于离散相模型范畴)是从离散相到连续相整体质量交换。 当微粒是连续相里的质量源时，质量交换是正的。 如果你不使用非预混合燃烧模型，DPM质量源将等于所有物种质量源来源(下面的DPMn物种源)的总和； 如果你使用非预混合的燃烧模型，它将等于DPM蒸发与液化作用加上DPM燃尽。DPM质量源的单位量是质量通量。
DPM散射
(属于离散相模型范畴)是包括辐射的离散相计算中的散开的系数(在方程11.3-1中的σ_s)。 其单位量是逆长度。
DPM显焓源
(属于离散相模型范畴)是从离散相到连续相的显焓交换。当微粒是连续相的热源时，交换是正的。 其单位量是功率。
DPM n物种源
(属于离散相模型范畴)是从离散相到蒸发或液化物种，由于熔滴微粒蒸发或燃烧微粒液化产生的质量交换。 (物种的名称将在DPM n物种源中替换物种n)。 这些物种被指定在调节注射性质面板中，如19.9.5节。 单位量是质量通量。 注意如果你使用非预混合的燃烧模型，这变量无效；用DPM蒸发与液化代替。
DPM旋转动量源
(属于离散相模型范畴)是从离散相到连续相的旋转动量交换。 当微粒是连续相的一个动量源时，值是正的。 单位量是力。
DPM X，Y，Z动量源
(属于离散相模型范畴)是从离散相到连续相的x-，y-，和z-方向的动量交换。 当微粒是连续相的一个动量源时，这些值是正的。 单位量是力。
动态压强
(属于压强范畴)定义为 $q \equiv \frac{1}{2}\rho v^2$ 。 其单位量是压强。

物种n的有效扩散系数
(属于物种范畴)是混合物中的一物种的层流和湍流扩散系数的总和：

$$D_{i,m} + \frac{\mu_t}{\rho \mathrm{Sc}_t}$$

（在物种 n 的有效扩散系数中物种名称会替代 n 物种。）单位量是质量通量。
有效普朗特数
(属于湍流范畴)是比值 $\mu_{\rm eff} c_p / k_{\rm eff}$ ，其中 $\mu_{\rm eff}$ 是有效粘度，c p是比热，而 $k_{\rm eff}$ 是有效的热传导率。
有效热传导率
(属于性质范畴)是层流和湍流热传导率的加和，流体$k + k_f$。大的热传导率说明是好的热导体，小的热传导率说明是差的热导体(好的绝热体)。 其单位量是热传导率。

有效粘度
(属于湍流范畴)是流体中层流和湍流粘度的总和。粘度 μ 定义为剪应力和剪切率的比值。 其单位量是粘性。
焓
(属于温度范畴)是为可压缩和不可压缩的流体做的不同定义，取决于处理器和模型的使用。
对于可压缩的流体，

$$H = \sum_j Y_j H_j \qquad (27.4.8)$$

对于不可压缩流体，

$$H = \sum_j Y_j H_j + \frac{p}{\rho} \qquad (27.4.9)$$

在这里，Y_j 和 H_j 分别是质量分数和物种 j 的焓。（参看下面的物种 n 的焓）对于隔离处理器，如果在能量方程（参看 11.2.1 节）里只有压力条件被包括那方程 27.4-9 右边的第二条也被包括。在绝热非预混和燃烧情况下，焓的绝热值基于局部平均混合分数。焓的单位量是比能。
N 相焓
（属于温度范畴）第 n 相的焓（前面定义的）。单位量是比能。
N 中焓
（属于物种范畴）根据处理器和模型面板的使用而不同定义。值为

$$H_j = \int_{T_{\mathrm{ref},j}}^{T} c_{p,j}\, dT + h_j^0(T_{\mathrm{ref},j}) \qquad (27.4.10)$$

在这里 $h_j^0(T_{\mathrm{ref},j})$ 是物种 j 在参考温度 $T_{\mathrm{ref},j})$ 下的形成焓，仅适用于非隔热 PDF 情况，或者如果选用耦合处理器。值为

$$h_j = \int_{T_{\mathrm{ref}}}^{T} c_{p,j}\, dT \qquad (27.4.11)$$

在这里，$T_{\mathrm{ref}} = 298.15K$， 适用于所有其他情况。物种 n 焓的单位量是比能。
熵
（属于温度范畴）是一种热力学性质，方程为

$$\Delta S \equiv \int_{\mathrm{rev}} \frac{\delta Q}{T} \qquad (27.4.12)$$

在这里 “rev”表示沿两个状态之间的可逆路径的累积，Q 是热，T 是温度。对于可压缩流体，熵由下列方程计算

$$s = c_v \left[\frac{p/p_{\mathrm{ref}}}{(\rho/\rho_{\mathrm{ref}})^{\gamma}} - 1 \right] \qquad (27.4.13)$$

这里 c_v 是由 $R/(\gamma-1)$ 算得，参考压强和密度由参考值面板定义。对于不可压缩流体，熵由下列方程计算

$$s = c_p\left(\frac{T}{T_{\rm ref}} - 1\right) \qquad (27.4.14)$$

在这里 c_p 是定压比热 $T_{\rm ref}$ 是由参考值面板定义的。熵的单位量为比热。

现存值

（属于配合范畴）是暂存在存储控制体积变量（例如，最后显示或计算的值）的临时空间里的值。

面的旋向性

（属于节点范畴）临近逆时针面的控制体积的一个参数，别处都是零度。它可用来定位网孔问题。

面的挤压指数

（属于节点范畴）用来衡量网孔性质，是每个面的面积矢量的点乘得来的，这个矢量是连接两个相邻控制体积的质心如

$$1 - \frac{\vec{A}_i \cdot \vec{r}_{c0/c1}}{|\vec{A}_i||\vec{r}_{c0/c1}|} \qquad (27.4.15)$$

因此，最差的控制体积的面挤压指数接近 1。

物种n的精密标度质量分数

(属于物种范畴)在方程13.1-30中的Y^*_i。

精密标度温度

(属于温度范畴)是有精密标度的温度，是由反应进行超过时间标度（方程13.1-29中的 τ^* ）的焓计算得出，由方程13.1-7阿伦纽斯速率控制。 其单位量是温度。

精密标度传输率

(属于物种范畴)是由精密标度的传输率，它等于逆时间标度(在方程13.1-29中的 τ^*)。其单位量是逆时间。

1-精密标度体积分数

(属于物种范畴)是一个精密标度体积分数的函数(在方程13.1-28中 ξ^*)。 数值从整体中被减去以便更容易解释。

Fvar测试

(属于Pdf范畴)是在非预混合燃烧模型(例如，方程14.1-5中最后两条)中解决的混合分数变量方程中生产条件。

Fvar2测试

(属于Pdf范畴)是在非预混合燃烧模型中解决的二级混合分数变量方程中的生产条件参见方程14.1-5。

气体常数（R）

(属于性质范畴)是流体的气体常数。 其单位量是比热。

颗粒压强...

包括每一个颗粒相的固体压强的数值。
N相颗粒压强
(属于颗粒压强范畴)是n相颗粒 (方程20.4-45中的p_s)的固体压强。 参见20.4.4节。其单位量是压强。
颗粒温度...
包括每一个颗粒相的颗粒温度的数值。
N相颗粒温度
(属于颗粒温度范畴)是n相颗粒 (在方程20.4-56中的 Θ_s)的颗粒温度。参见20.4.6节。其单位量是温度。
网格节点...
包括与网格节点有关的变量。
网格X速度，网格Y速度，网格Z速度
(属于速度范畴)是移动网格问题(旋转或者多重的坐标系，混合平面或者滑动格网，)中的网格速度的矢量组成部分。 其单位量是速度。
螺旋性
(属于速度范畴)是定义为涡旋状态和速度矢量的点乘。

$$H = (\nabla \times \vec{V}) \cdot \vec{V} \quad (27.4.16)$$

它帮助观察沿液流排列的涡旋状态。 当它在流领域中移动时，涡旋状态用来衡量运动在流场中的流体成分的旋转。
入射辐射
(属于辐射范畴)是全部辐射能量，G，每单元时间和每单元面积照射面积：

$$G = \int_{\Omega=4\pi} I d\Omega \quad (27.4.17)$$

在这里，I是辐射强度Ω是立体角。 G是P-1辐射模型计算值。 对于DO辐射模型，入射辐射的计算通过带有矢量方向的离散立体角的有限值。 入射辐射的单位量是热通量。
入射辐射(第n带)
(属于辐射范畴)是在非灰色DO辐射模型中包含在波长带 $\Delta\lambda$ 中的辐射能量。 其单位量是热通量。
内能
(属于温度范畴)是每单位容量物质的分子(在没有化学反应或者原子核反应中)的动能和势能总和。 它被定义为 $e=c_v T$。 其单位量是比能。
物种n的层流扩散系数
(属于物种范畴)是一混合物中物种的层流扩散系数，$D_{i,m}$。其单位量是质量扩散率。
层流焰速度
(属于预混合燃烧范畴)是层流预混合焰(方程 15.2-4中的U_f)的传播速度。 其单位量是速度。
液体分数
(属于凝固与熔化范畴)是凝固与熔化模型中计算的液体分数β： `

$$\beta = \frac{\Delta H}{L} = 0 \quad \text{if} \quad T < T_{\text{solidus}}$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{L} = 1 \quad \text{if} \quad T > T_{\text{liquidus}}$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} \quad \text{if} \quad T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \tag{27.4.18}$$

马赫数
(属于速度范畴)是声音的速度和速度的比值。
HCN的质量分数，NH3的质量分数，NO的质量分数
(属于NOx范畴)是每单位质量混合物中HCN的质量，NH_3的质量，和NO的质量（例如，1千克混合物中HCN的千克数）。仅当你建模燃料NOx，NH3的质量分数和HCN质量分数将出现。参见17.1.5节。
核的质量分数
(属于烟灰范畴)是每单位质量混合物中微粒值（在每千克10^{15}微粒单位范围内）。仅当你用两步烟灰模型，核的质量分数将出现。 参见17.2节。
烟灰的质量分数
(属于烟灰范畴)是每单位质量混合物中烟灰的质量(例如，1公斤的混合物中烟灰的公斤数)。 参见17.2节。
物种n的质量分数
(属于物种范畴)是每单位质量混合物中一物种的质量(例如，1公斤的混合物中物种的公斤数)。
平均值n
(属于不稳定统计范畴)是一种解决变量的时间平均值(例如静态压强)。参见22.15.3节。
经纬线坐标
(属于网格范畴)是沿着流程从入口到出口的规范（无因次）坐标。其值的变化从0到1。
混合分数变量
(属于Pdf范畴)是在非预混合燃烧模型中解决的混合分数的变量。这是非预混合燃烧模型中的第二个守恒方程(连同混合分数方程)。 (参见14.1.2节)。
修正的湍流粘度
(属于湍流范畴)是在Spalart-Allmaras湍流模型(参见方程10.3-1)中的传输量 $\tilde{\nu}$。湍流粘度 μ_t 由方程10.3-2给出的关系来直接计算。 其单位量是粘度。
物种n的摩尔分数
(属于物种范畴)是一物种在一摩尔混合物中的摩尔数。
HCN的摩尔分数，NH3的摩尔分数，NO的摩尔分数
(属于NOx范畴)是HCN，NH3,NO在一摩尔混合物中的摩尔数。仅当你建模燃料NOx，NH3和HCN的摩尔分数将出现。 参见17.1.5节。
分子的普朗特数
(属于性质范畴)是比值 $c_p\mu_{\text{lam}}/k_{\text{lam}}$ 。
分子粘度
(属于性质范畴)是流体的层流粘度。粘度，μ，定义为剪应力同剪切率的比值。其单位量是粘度。
N相的分子粘度

(属于性质范畴)是第n相的层流粘度。 其单位量是粘度。

NOx ...

包含与NOx模型有关的数值。 关于这个模型的详细内容参见17.1节。

分区边界控制体积距离

(属于网格范畴)是横贯控制体积到最近的分区(分界面)边界的最小值。

分区邻域

(属于控制体积信息范畴)是相邻分区的数目(例如，共享至少一个分区边界面(分界面)的分区)。它给多重处理产生的信息数字提供了量度标准。

Pdf ...

包含与非预混合燃烧模型有关的数值，这在第14章有叙述。

相...

包含每个相的体积分数的数值。 参见第20章。

Pitchwise坐标

(属于网格范畴)是在圆周（pitchwise）方向的规范化(尺寸)坐标。其值的变化从0到1。

预处理参考速度

(属于速度范畴)是用于耦合处理器的预处理运算法则的参考速度。参见22.4.2节。

预混合燃烧...

包含与预混合燃烧模型有关的数值，这在第15章中有叙述。

压强...

包括与每单位面积的正交力有关的数值(气体分子对控制体积表面的冲击)。

压强系数

(属于压强范畴)是被下列方程定义的一个无因次参数

$$C_p = \frac{(p - p_{\rm ref})}{q_{\rm ref}} \qquad (27.4.19)$$

p是静态压强，$p_{\rm ref}$ 是参考压强，而 $q_{\rm ref}$ 是定义为 $\frac{1}{2}\rho_{\rm ref} v_{\rm ref}{}^2$ 的参考动态压强。参考压力，密度，和速度都被定义在参考值面板中。

产物形成率

(属于预混合燃烧范畴)是在进展变量传递方程(方程15.2-1中的S_c)中原始条件。其单位量是逆时间。

K产物

(属于湍流范畴)是湍流动能(时间密度)的生成率。其单位量是湍流动能产物。

N相k产物

(属于湍流范畴)是第n相的湍流动能(时间密度)的生成率。其单位量是湍流动能产物。

进展变量

(属于预混合燃烧...范畴)是燃烧产物(c=1)或不燃混合产物（c=0）的一个标准质量分数，定义为方程15.2-2。

性质...

包括流体和固体的材料性质数值。

径向坐标

(属于网格...范畴)是极坐标系中的矢径的长度。矢径定义为节点和转动轴之间的一条线段。你可以在流动面板中定义旋转轴。(参见27.2节)。径向坐标的单位量是长度。

径向牵引速度
(属于凝固与熔化...范畴)是固体材料在连续铸造过程中的牵引速度的径向组成部分。其单位量是速度。
径向速度
(属于速度...范畴)是速度在径向的组成部分。(参见27.2节)。径向速度的单位量是速度。
N相径向速度
(属于速度...范畴)是第n相的径向方向的速度组成部分。其单位量是速度。
径向壁剪应力
(属于壁流...范畴)是作用在摩擦面的切线力的径向组成部分。其单位量是压强。
辐射...
包括与辐射热传递有关的数值。 关于FLUENT中的有效辐射模型的细节参见11.3节。
辐射热流
(属于壁流...范畴)通过控制表面的辐射热的传递率。它通过处理器指定的辐射模型来计算。热流从区域里传出是负的，而热流进入领域是正的。辐射热流的单位量是热流。
辐射温度
(属于辐射...范畴)是数值 θ_R，定义为

$$\theta_R = (\frac{G}{4\sigma})^{1/4} \qquad (27.4.20)$$

G是入射辐射。辐射温度的单位量是温度。
n反应率
(属于反应...范畴)是第n反应的有效进展率。对于有限率模型，其值与反应n的阿伦组斯率一样。对于漩涡逸散模型，其值等于反应n的湍流率。对于有限率与漩涡逸散模型，它是两者中更小的。
反应...
包括与有限率反应有关的数值。关于模拟有限率反应的内容参见章13。
折射率
(属于辐射...范畴)是定义为光在一种材料中与在真空中速度的比值的一个无因次参数。参见11.3.6节。
相对轴向速度
(属于速度...范畴)是相对坐标系运动的速度的轴向组成部分。参见27.2节。相对轴向速度的单位量是速度。
相对湿度
(属于物种...范畴)是存在于空气水分混合物中的水蒸气的部分压力与在混合温度下水蒸气的饱和压力的比值。FLUENT计算的饱和压强，p，根据如下方程[190]：

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T} - 1\right) \times \sum_{i=1}^{8} F_i \left[a\left(T - T_p\right)\right]^{i-1} \qquad (27.4.21)$$

在这里 p_c = 22.089 MPa

T_c = 647.286 K

F_1 = -7.4192420

F_2 = 2.9721000×10^{-1}

F_3 = $-1.1552860 \times 10^{-1}$

F_4 = 8.6856350×10^{-3}

F_5 = 1.0940980×10^{-3}

F_6 = $-4.3999300 \times 10^{-3}$

F_7 = 2.5206580×10^{-3}

F_8 = $-5.2186840 \times 10^{-4}$

a = 0.01

T_p = 338.15 K

相对马赫数
(属于速度...范畴)是相对速度和声速的无因次比值。
相对径向速度
(属于速度...范畴)是相对坐标系运动的速度的径向组成部分。(参见27.2节)。相对径向速度单位量是速度。
相对旋转速度
(属于速度...范畴)是在轴对称回旋流中相对坐标系运动的速度的切向组成部分。(参见27.2节)。相对旋转速度的单位量是速度。
相对切向速度
(属于速度...范畴)是相对坐标系运动的速度的切向组成部分。(参见27.2节)。相对切向速度的单位量是速度。
相对总压强
(属于压强...范畴)是用相对速度代替绝对的速度来计算的停滞压强；例如，对于不可压缩的流体动态压强要用相对速度计算。(关于相对速度的内容参见27.2节)。相对总压强的单位量是压力。
相对总温度
(属于温度...范畴)是用相对速度代替绝对的速度计算的停滞温度。(关于相对速度的内容参见27.2节)。相对总温度的单位量是温度。
相速度角度

(属于速度...范畴)除了它使用的是相对切向速度外其他类似于速度角度，定义为

$$\tan^{-1}\left(-\frac{\text{relative-tangential-velocity}}{\text{axial-velocity}}\right) \tag{27.4.22}$$

其单位量是角度。
相对速度大小

(属于速度...范畴)是相对速度矢量代替绝对的速度矢量的大小。相对速度($\vec{w}$)是不同于绝对速度($\vec{v}$)和网格速度。对于简单的旋转，相对速度定义为

$$\vec{w} \equiv \vec{v} - \vec{\Omega} \times \vec{r} \tag{27.4.23}$$

在这里，$\vec{\Omega}$是旋转坐标系的角速度，$\vec{r}$是位置矢量。(参见27.2节)。相对速度大小的单位量是速度。
相对X速度，相对Y速度，相对Z速度
(属于速度...范畴)是相对坐标系运动的速度的x-，y-，和z-方向分量。(参见27.2节)。这些变量的单位量是速度。
残值...
包含隔离和耦合处理器的不同的数值：
在耦合处理器中，这范畴包括纠正原始的变量压强，速度，温度，物种，还有纠正这些原始变量所做的当前重复的时间变率（例如，残值）。纠正是这些变量在根据物理时间步骤划分一控制体积的纠正计算得出的当前的和先前的重复值和残值之间的变化。每一变量的总残值是欧拉总和，粘滞，和逸散影响。逸散分量是flux-like，face-based逸散操作的矢量组成部分。
在隔离处理器中，每一控制体积只有质量不平衡被计算(除非你要求其他量，如22.16.1节所述)。在收敛点，与平均质量流率相比这数值应该是小的。
RMS n数值
(属于不稳定统计...范畴)是一种解决变量的根平均平方值(例如，静态压强)。参见22.15.3节。
Rothalpy
(属于温度...范畴)定义为

$$I = h + \frac{w^2}{2} - \frac{u^2}{2} \tag{27.4.24}$$

h是焓，w是相对速度大小，而u是旋转速度 $\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ 的大小。
N标量
(属于用户定义标量...范畴)是你已经定义为用户定义标量的第n标量的值。关于用户定义标量的内容参见专业的UDF手册。
逸散标量
(属于Pdf...范畴)是描述在混合部分空间的层流焰的物种的质量分数和温度这两个参数之一。定义为

$$\chi = 2D|\nabla f|^2 \tag{27.4.25}$$

f是混合分数，D是代表扩散系数(参见14.4.3节)。其单位量是逆时间。

散射系数

(属于辐射...范畴)是描述在媒介中传播每单位路径长度散射的辐射热的量的一个媒介的性质。它可以解释为一个光子在散射之前(如果散射系数不沿着路径变化)经过的平均自由路径。散射系数的单位量是逆长度。

二级平均混合分数

(属于Pdf...范畴)是二级流质量分数与燃料，二级流，和氧化剂质量分数的总和的平均比值。这是非预混合燃烧模型计算得出的二级流保存量。参见14.1.2节。

二级混合分数变量

(属于Pdf...范畴)是在非预混合燃烧模型中解决的二级流混合分数变量。参见14.1.2节。

表面摩擦系数

(属于壁流...范畴)是定义为壁剪应力和参考动态压强的比值的一个无因次参数

$$C_f \equiv \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho_{\rm ref} v_{\rm ref}^2} \tag{27.4.26}$$

τ_w 是壁剪应力，$\rho_{\rm ref}$ 和 $v_{\rm ref}$ 是在参考值面板中定义的参考密度和速度。

N相表面摩擦系数

(属于壁流...范畴)是第n相的表面摩擦系数(在上面定义)。

凝固与熔化...

包含与凝固和熔化有关的数值。

烟灰...

包含与烟灰模型有关的数值，这在17.2节中有叙述。

声音速度

(属于性质...范畴)是音速。它通过 $\sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$ 计算。 其单位量是速度。

Spanwise坐标

(属于网格...范畴)在spanwise方向从中心到外包的规范坐标。其值的变化从0到1。

物种n原始条件

(属于物种...范畴)因为反应在每个物种传递方程中的原始条件。单位量是kg/m^3-s。

物种...

包括与物种传递和反应有关的数值。

具体逸散率(Omega)

(属于湍流...范畴)在单位容量和时间内湍流动能的逸散率。 其单位量是逆时间。

比热(Cp)

(属于性质...范畴)是比热在恒压下的热力学性质。定义为当压力恒定时，焓随温度的变化率。其单位量是比热。

比热比率(gamma)

(属于性质...范畴)是在常压下的比热与在恒容下的比热的比值。

存储控制体积分区

(属于控制体积信息...范畴)是一个指明特殊控制体积所属分区的整数标识符。在问题中利用fluent平行型式网格被分成为若干的分区在多重的处理器上解决，分区ID能被用来确定各种控制体积群的范围。活跃的控制体积分区用于当前的计算，当你保存一情况文件时，而存储控制体积分区(最后的分区执行)被使用。参见28.4.3节。

静态压强

(属于压强...范畴)是流体的静态压强。它是表示相对于规定操作压强的一种标准压强。绝对压强是静态压强和操作压强的总和。其单位量是压强。

静态温度

(属于温度...和非预混合燃烧...范畴)是测量活动流体的温度。其单位量是温度。

注意,仅在隔热的预混和燃烧计算中静态温度将出现在预混合燃烧范畴。参见15.3.7节。

应变率

(属于导数...范畴)相对剪应力比粘度。也叫剪切率(在方程7.3-17中的 $\dot{\gamma}$)，应变率与变形张量 $\overline{\overline{D}}$ 的第二个不变量有关。其单位量是逆时间。在3D笛卡儿坐标中，应变率，S，定义为

$$S^2 = \left[\frac{\partial u}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial u}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial u}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]+$$
$$\left[\frac{\partial v}{\partial x}\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial v}{\partial y}\left(\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial v}{\partial z}\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right]+$$
$$\left[\frac{\partial w}{\partial x}\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)+\frac{\partial w}{\partial y}\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)+\frac{\partial w}{\partial z}\left(\frac{\partial w}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right] \quad (27.4.27)$$

N相的应变率

(属于导数...范畴)是第n相的应变率(在上面定义)。其单位量是逆时间。

流量函数

(属于速度...范畴)是阐述流线和质量守恒定律之间的一种关系。 一条流线是与流动的流体的速度矢量正切的一条线。对于2D平面流，流量函数ψ定义为

$$\rho u \equiv \frac{\partial \psi}{\partial y} \qquad \rho v \equiv -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (27.4.28)$$

ψ是沿流线的常数，流量函数常数之间的不同值定义为两种流线型是流线型之间的质量流速。

流量函数计算的精确性由文本命令/显示/装置/n-流量函数确定。

伸展因数

(属于预混合燃烧...范畴)是定义为未熄灭焰的概率的一个无因次参数(方程 15.2-10中的G)。

次网格湍流动能

(属于湍流...范畴)是每单位质量未分辨涡流的湍流动能，k s，使用LES湍流模型计算。定义为

$$k_s = \frac{\nu_t^2}{L_s^2} \tag{27.4.29}$$

其单位量是湍流动能。

次网格湍流粘性

(属于湍流...范畴)是利用LES湍流模型计算的流体湍流（动态）粘性。它描述了次网格范围应力张量的各项异性部分和应变张量率之间的均衡性。(参见方程10.7-7）。 其单位量是粘性。

次网格湍流粘性率

(属于湍流...范畴)是流体的次网格的湍流的粘性率与层流粘性的比值，利用LES湍流模型计算。

表面集群ID

(属于辐射...范畴)用来察看分配领域中的表面集群。每一集群有与它有关的唯一的整数数字(ID)。

物种n的表面沉积率

(属于物种...范畴)是积存在底层的一表面物种的数量。其单位量是质量流量。

表面传热系数。

(属于壁流...范畴)定义为

$$h_{\text{eff}} = \frac{q}{T_{\text{wall}} - T_{\text{ref}}} \tag{27.4.30}$$

q是对流热流量，T_{wall}是壁温，T_{ref}是定义在参考价值面板中的参考温度。其单位量是传热系数。

表面入射辐射

(属于壁流...范畴)是在一个表面上的净入射辐射热流。其单位量是热流。

表面努珊数

(属于壁流...范畴)是局部无因次传热系数，定义为

$$\text{Nu} - \frac{h_{\text{eff}} L_{\text{ref}}}{k} \tag{27.4.31}$$

h_{eff}是传热系数的地方，L_{ref}是定义在参考价值面板中的参考长度，k是分子热传导率。

表面斯坦顿数

(属于壁流...范畴)是无因次传热系数定义为

$$\text{St} = \frac{h_{\text{eff}}}{\rho_{\text{ref}} v_{\text{ref}} c_p} \tag{27.4.32}$$

h_{eff}是传热系数，ρ_{ref} v_{ref}是密度和速度的参考价值，在参考价值面板中定义，而c p是定压比热。

旋转牵引速度

(属于凝固与熔化...范畴)是固体材料在连铸过程的牵引速度的切向分量。单位量是速度。

旋转速度
(属于速度...范畴)是速度在轴对称回旋流的切线分量。参见27.2段。旋转速度的单位量是速度。
N相旋转速度
(属于速度...范畴) 第n相的轴对称回旋流中速度的切线分量。其单位量是速度。
回旋壁剪应力
(属于壁流...范畴)是切向作用于摩擦表面的力的回旋部分。其单位量是压强
切线速度
(属于速度...范畴)是切线方向的速度分量。(参见27.2度段)。切线速度的单位量是速度。
温度...
说明与一种材料的热力学温度有关的数值。
热传导率
(属于性质...范畴)是定义为利用傅立叶定律($q=-k\nabla T$)通过一种材料的热传导率的一个参数(k)。 大的热传导率说明是好的热导体，小的热传导率说明是差的热导体(好的绝热体)。其单位量是热传导率。
物种n的热扩散系数
(属于物种...范畴)是第n物种(方程7.7-1，7.7-3，和7.7-7的$D_{T,i}$)的热扩散系数。其单位量是粘性。
时间步骤
(属于残值...范畴)是控制体积的局部时间步骤，Δt，在当前的反复水平。 其单位量是时间。
时间步骤范围
(属于物种...范畴)是被刚性化学处理器简化的时间步骤的因素(仅仅在耦合处理器中有效)。时间步骤被缩减基于一个特征值和积极分析。
总能量
(属于温度...范畴)是每单位质量的总能。其单位量是比能。
N相总能量
(属于温度...范畴)是每单位质量第n相的总能量。其单位量是比能。
总焓
(属于温度...范畴)被定义为 $H+\frac{1}{2}v^2$ H是第n相焓和v是第n相速度大小。其单位量是比能。
N相的总焓
(属于温度...范畴)被定义为 $H+\frac{1}{2}v^2$ H是第n相焓，v是第n相速度大小。其单位量是比能。
总焓偏差
(属于温度...范畴)是总焓和参考焓之间的区别，$H+\frac{1}{2}v^2-H_{\rm ref}$ ， $H_{\rm ref}$ 在其中是

在参考价值面板中被定义的参考焓。总焓偏差的单位量是比能。
第n相的总焓偏差

(属于温度...范畴)是第n相总焓和参考焓之间的区别，$H+\frac{1}{2}v^2-H_{\rm ref}$，在其中

$H_{\rm ref}$是在参考价值面板中被定义的参考焓。第n相的总焓偏差的单位量是比能。
总压强
(属于压强...范畴)是如果流体处于零速度和零势能，将存在的热力学状态的压强。对于可压缩流体，总压强利用等熵关系式被计算。对于常数c p，有：

$$p_0=p\left[1+\frac{\gamma-1}{2}{\rm M}^2\right]^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{27.4.33}$$

p是静态压强，r是比热的比率，而M是马赫数。对于不可压缩流体(常密度流体)，我们使用Bernoulli方程，$p_0=p+p_{\rm dyn}$，在其中$p_{\rm dyn}$是局部动态压强。其单位量是压强。
总表面热流
(属于壁流...范畴)是通过控制表面的热传递率。处理器根据在那个表面所应用的边界条件来计算。根据定义，流出领域的热流是负的，而流入领域的热流是正的。总表面热流的单位量是热流。
总温度
(属于温度...范畴)是如果流体处于零速度，将存在热力学状态温度。对于可压缩的流体，总温度利用当前的c p方法(指定在材料面板中)从总焓中计算。对于不可压缩的流体，总温度等于静态温度。总温度的单位量是温度。
湍流...
包括与湍流有关的数值。关于FLUENT中的湍流模型的信息参见10章。
湍流强度
(属于湍流...范畴)是RMS湍流波动大小与参考速度的比值：

$$I=\frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{v_{\rm ref}} \tag{27.4.34}$$

k是湍流动能，$v_{\rm ref}$是被指定在参考价值面板中的参考速度。 参考值应该是流体平均速度大小。注意，湍流强度能按照不同的方式被定义，因此你可以为其定义使用自定义流场函数。参见27.5段。
湍流消散率(Epsilon)
(属于湍流...范畴)是湍流消散率。其单位量是湍流能消散率。
N相湍流消散率
(属于湍流...范畴)是第n相湍流消散率。其单位量是湍流能消散率。
湍流焰速度
(属于预混和燃烧...范畴)是利用FLUENT方程15.2-4计算的湍流焰速度。其单位量是速度。
湍流动能(k)
(属于湍流...范畴)是每单位质量的湍流动能定义为

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i' u_i'} \tag{27.4.35}$$

其单位量是湍流动能。
N相湍流动能
(属于湍流...范畴)是每单位质量n相的湍流动能（上面定义的）。其单位量是湍流动能。
反应n的湍流率
(属于反应...范畴)是被方程13.1-25或13.1-26计算的n反应的进展率。对于“涡流消散”模型，其值与反应n的率一样。对于“有限率”模型，其值是零。
湍流雷诺数
(属于湍流...范畴)是一无因次数值定义为

$$\frac{\rho d\sqrt{k}}{\mu_{\rm lam}} \tag{27.4.36}$$

k是湍流动能，d是对最邻近的壁距离，而 $\mu_{\rm lam}$ 是层流粘性。
湍流粘性
(属于湍流...范畴)是利用湍流模型计算的流体湍流粘性。其单位量是粘性。
N相湍流粘性
(属于湍流...范畴)是第n相湍流粘性，利用湍流模型来计算。其单位量是粘性。
湍流的粘性比
(属于湍流...范畴)是湍流粘性与层流粘性的比值。
udm-n
(属于用户定义存储...范畴)是第n用户定义存储位置的数值。
非燃烧燃料质量分数
(属于预混合燃烧...范畴)是非燃烧燃料的质量函数。这函数仅仅对非绝热模型有效。
不稳定统计...
包括起瞬时流计算的解决变量的平均值和均方根值(RMS)。
用户定义存储...
包括已被分配到一用户定义存储位置的数值。关于用户定义存储的信息参见专业的UDF手册。
用户定义范围...
包括与用户定义范围有关的数值。关于用户定义范围的信息参见专业的UDF手册。
UU 雷诺应力

(属于湍流...范畴)是 $\overline{u'^2}$ 应力。

UV 雷诺应力

(属于湍流...范畴)是 $\overline{u'v'}$ 应力。

UW 雷诺应力

(属于湍流...范畴)是 $\overline{u'w'}$ 应力。

物种变量
(属于NOx...范畴)是流量领域中的一选择的物种的质量分数的变量。由方程17.1-86来

计算。
物种1的变量，物种2的变量
(属于NOx...范畴)是流量领域中的选择物种的质量分数的变量。由方程17.1-86来计算。
温度变量
(属于NOx...范畴)是流量领域中的标准温度的变量。由方程17.1-86来计算。
速度...
包括与随时间的位置变化率有关的数值。一种微粒的瞬时速度定义为位置矢量对时间的一阶导数，$d\vec{r}/dt$，称为速度矢量，$\vec{v}$。
速度角度
(属于速度...范畴)被定义如下：
对于2D模型，

$$\tan^{-1}\left(\frac{\text{y-velocity-component}}{\text{x-velocity-component}}\right) \tag{27.4.37}$$

对于2D或轴对称模型

$$\tan^{-1}\left(\frac{\text{radial-velocity-component}}{\text{axial-velocity-component}}\right) \tag{27.4.38}$$

对于3D模型

$$\tan^{-1}\left(\frac{\text{tangential-velocity-component}}{\text{axial-velocity-component}}\right) \tag{27.4.39}$$

单位量是角度
速度大小
(属于速度...范畴)是流体的速度。 其单位量是速度。
N相速度大小
(属于速度...范畴)是第n相的速度。 其单位量是速度。
N相的体积分数
(属于相...范畴)是第n相的体积分数。
涡旋状态量级
(属于速度...范畴)是涡旋状态矢量的量级。 当它在流量领域中移动时，涡旋状态是一个流体元素旋转的一个量度，而被定义为卷曲速度矢量：

$$\xi = \nabla \times \vec{V} \tag{27.4.40}$$

VV 雷诺应力

(属于湍流...范畴)是 $\overline{v'^2}$ 应力。

VW 雷诺应力

(属于湍流...范畴)是 $\overline{v'w'}$ 应力。

壁流量...
包括与在壁表面的力和传热有关的数值。

壁剪应力
(属于壁流...范畴)是切向作用与摩擦表面的力。其单位量是压强。
N相壁剪应力
(属于壁流...范畴)是第n相切向作用于摩擦表面的力。其单位量是压强。
壁温度(内表面)
(属于温度...范畴)是在壁(相应于远离流体或者固体的控制体积邻域的壁表面的边)的内表面上的温度。注意，壁热边界条件在这表面上被应用。参见图6.13.2。壁温度(内表面)的单位量是温度。
壁温度(外表面)
(属于温度...范畴)是在壁(相应于远离流体或者固体的控制体积邻域的壁表面的边)的外表面上的温度。 注意，壁的热边界条件在这个表面上被应用。参见图6.13.2。壁温度(外表面)的单位量是温度。
壁Yplus
(属于湍流...范畴)是一个无因次参数定义为

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_P}{\mu} \tag{27.4.41}$$

$u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho_w}$ 是摩擦速度，y_p是从点P到壁的距离，ρ是流体的密度，μ是流体在点P的粘性。参见10.8节。
N相壁Yplus
(属于湍流...范畴)是y+利用第n相的湍流动能，密度，和粘性计算(如前面定义的)的值。
壁Ystar
(属于湍流...范畴)是一个无因次参数定义为

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \tag{27.4.42}$$

k_p是点P的湍流动能，y P是从点P到壁的距离，ρ是流体的密度，μ是点P的流体粘度。参见10.8节。
WW 雷诺应力
(属于湍流...范畴)是 $\overline{w'^2}$ 应力。
X坐标，Y坐标，Z坐标
(属于网格...范畴)是在x轴，y轴，和z轴方向的笛卡尔坐标。这些变量的单位量是长度。
X面面积，Y面面积，Z面面积
(属于网格...范畴)是边界面面积矢量积聚到控制体积边界的组成部分，在边界配合面板中的边界区域列表中选择区域。“面”的面积只能在区域选择上计算，为了使你的选择活跃，你需要单击边界配合面板中的MARK按钮。注意，如果边界区域列表空，所有边界区域将加以使用。“面”的面积计算在X表面区域Y表面区域Z表面区域(参看下面)中完成，除控制体积中的面积值之外不能加总超过一条边界“面”来获得控制体积值的总数。相反，与最后访问过的每个控制体积的面有关的面积值(因你对边界区域的选择导致)都被当作控制体积值。
X牵引速度，Y牵引速度，Z牵引速度

(属于凝固与熔化...范畴) 是固体材料在连铸过程的牵引速度的x，y，z分量。每个的单位量都是速度。
X表面区域，Y表面区域，Z表面区域
(属于网格...范畴)是边界面面积矢量积聚到控制体积边界的分量。表面区域是所有的边界面的积聚。对于每个边界面区域，相应方向(x，y，或者z)中的“面”面积的分量被积累作为邻近的控制体积的值。对于那些不止一条边界面的控制体积，控制体积的值是所有“面”面积值的总数(积累)。在大多数环境中，X表面区域，Y表面区域，Z表面区域都用于流量和表面积分。 在区域积累必须被避免的极少数场合中，你可以标记重要区域，用X面区域，Y面区域，Z面区域（参看上面）来进行流量和积分计算。
X速度，Y速度，Z速度
(属于速度...范畴)是速度向量在x轴，y轴，和z轴方向的分量。这些变量的单位量是速度。
N相 X速度，n相 Y速度，n相 Z速度
(属于速度...范畴)是每相的速度向量在x轴，y轴，和z轴的分量。这些变量的单位量是速度。
X涡旋状态，Y涡旋状态，Z涡旋状态
(属于速度...范畴)涡旋状态矢量的x，y，和z组成部分。
X壁剪应力，Y壁剪应力，Z壁剪应力
(属于壁流...范畴)是切向作用于摩擦面的力的x，y，和z分量。这些变量的单位量是压强。
N相 X壁剪应力，n相 Y壁剪应力，n相 Z壁应力
剪应力(属于壁流...范畴)是在第n相上切向作用于摩擦表面的力的x，y，和z分量。这些变量的单位量是压强。

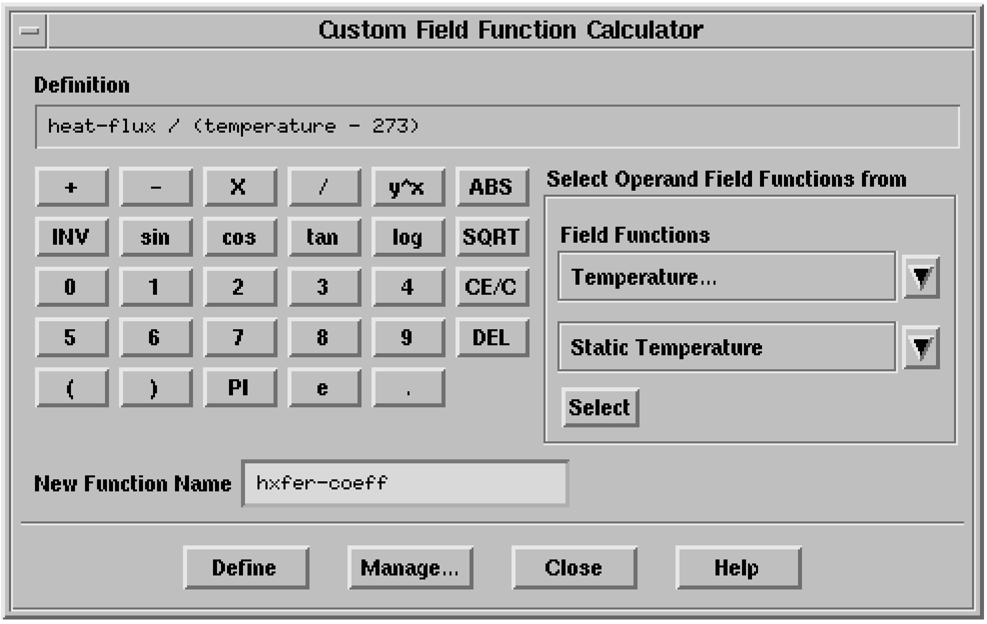
27.5 自定义流场函数

除了 fluent 提供的基本流场变量以外（和 27.4 节介绍的），你也可以用这些变量（等值线和矢量显示，XY 图表，等等）结合一些命令定义自己的流场函数。这个功能由自定义流场函数计算面板提供。你可用默认流场变量，先前定义的计算函数和计算执行器来建立新的函数。（许多函数示例在 27.5.3 节）
下次你存的时候，任何你定义的流场函数会被存到指定文档里。你也可以保存你的自定义函数到一个单独文档（如 27.5.2 描述的），这样可以区分。
！！注意所有的自定义流场函数会被估值储存到 SI 单元。你在你的流场函数定义中用的任何解算器定义的流体变量如果不在 SI 单元会自动修改，但是你必须在适当的单元里小心输入常数。也要注意具体节点值在自定义流场函数中并不有效，这些函数的所有节点值通过取控制体积边界值的平均来计算，正如 27.1.2 节描述的。

27.5.1 建立一个自定义流场函数

要建立你的流场函数，你要用自定义流场函数计算面板（图 27.5.1）。这个面板允许你利用简单的计算执行器在现有的函数基础上定义流场函数。任何你定义的函数会被添加到默认流体变量列表和计算器提供的其他流场函数。
定义———定义流场函数
！！你必须在 SI 单元输入所有的函数定义中的常数。

Figure 27.5.1: The **Custom Field Function Calculator** Panel



建立一个自定义流场函数的步骤如下：

1．用计算器按钮和流场函数列表和 select 按钮来列入函数定义，像下面描述的。（当你在流场函数列表中选择每个条目或单击计算器键盘的一个按钮，它的符号将出现在定义文字输入栏。你不能直接编辑这个栏里的内容，如果你想删除某函数的部分，用键盘上的 del 键。）

2．在新函数名称区列入函数名称

！！要明确你不能输入已使用的标准流场函数的名称（例如，速度大小），当选择 display/contours 文本命令然后查看 contours of 选项，你会看到在 fluent 里先前定义的流场函数完整的列表。

3．单击 define 按钮。

当你单击 define，解算器会建立这个函数，把它加到有效流场函数下拉列表中的自定义流场函数列表。当你建立完一个新的函数或者定义文本输入栏空的时候 define 按钮变成灰色。

当你已经完成定义，你决定重命名或删除函数，你可以单击 manage 按钮打开流场函数定义面板来操作。参看 27.5.2 节。

使用计算器按钮

你的函数定义可以包括许多基础计算操作（例如，加，减，乘，平方根）。当你选择计算器按钮（单击它），适当的符号会出现在定义文本输入栏。按钮的意义很简单，它们同你见过的标准的计算器的按钮一样。你应该注意以下几点：

。CE/C 按钮会清除你输入的整个定义和新的函数名称。DEL 按钮会删除仅仅最后输入到定义文本输入栏。你可以用 DEL 一个一个删除每个字符，从新开始。

。要获得反三角函数 arcsin,arcos,和 arctan，在选择 sin,cos,或者 tan 之前单击 INV 按钮。

。ABS 按钮可获得数的绝对值，LOG 按钮可获得数的自然对数。

。PI 按钮代表 π ，e 按钮代表自然对数系的基数（大约等于 2.71828）。

使用流场函数列表

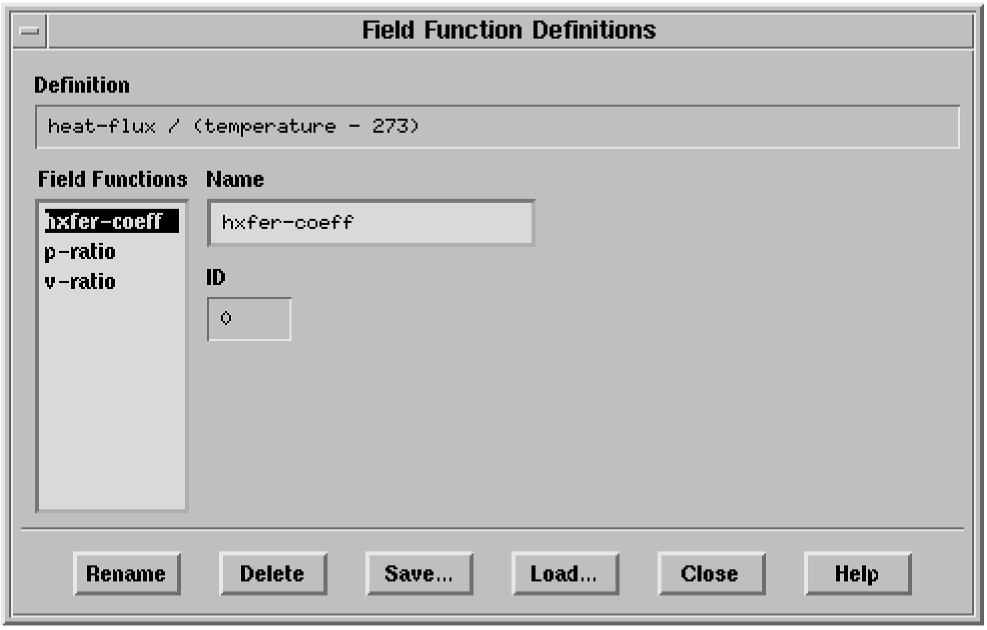
你的函数定义可以包括任何解算器定义的（27.4 节列出）或你定义的流场函数。要在你的函数定义中包括一个其中的变量/函数，在流场函数下拉列表中选择它然后单击表下面的 select 按钮。所选条目的符号会出现在定义文本输入栏中（例如，如果选择静态压强 P 会出现）。

27.5.2 操作，保存，载入自定义流场函数

一旦你定义了你的流场函数，你可以通过流场函数定义面板（图 27.5.2）使用他们。你可以列出一个函数定义来确定是否正确，如果你认为它不正确可以删掉函数或重新定义或给函数新的名称。你也可以保存自定义的流场函数到一个文档里，或读取文档的函数。自定义流场函数允许你在文档之间移动你的自定义函数。

要打开流场函数定义面板，在自定义流场函数计算面板里单击 manage 按钮。

Figure 27.5.2: The **Field Function Definitions** Panel



在流场函数定义面板中可执行如下操作：

。要检查函数的定义，先在流场函数列表里选择它。它的定义会出现在定义区。它的目的只是显示信息，你不能编辑它。如果你想要改变一个函数定义，你必须删除函数重新定义它在自定义函数面板里。

。要删除函数，须在流场函数列表里选择它然后单击 Delete 按钮。

。要给函数重新命名，须在流场函数列表里选择它，在名称区输入一个新的名称，然后单击 Rename 按钮。

！！要明确你不能列出一个已经使用的标准流场函数（例如，速度大小），当选择 display/contours 文本命令然后查看 contours of 选项，你会看到在 fluent 里先前定义的流场函数完整的列表。

。要保存流场函数列表中所有的函数到一个文档，单击 save 按钮然后在选择文件对话框中输入文件名。

。要从一个你按上述步骤保存的文档里读取自定义流场函数，单击 load 按钮，然后在选择文件对话框中选择文件名。（自定义流场函数文件时有效的 scheme 函数，也可以从 file/read/scheme 菜单条目中载入，如 3.15 节描述的。）

27.5.3 自定义流场函数示例

当你检查你模拟的结果，你会发现定义一些如下的流场函数很有用：

要定义一个确定静态压强与入口总压强的比率函数，用下面关系式

$$R = \frac{p + p_{\rm op}}{p_{\rm to} + p_{\rm op}} \qquad (27.5.1)$$

处理器设置 P 为静态压强，P_{to} 为入口总压强，P_{op} 为操作压强。用处理器定义函数静态压强

为 P,指定增压管面板的测量总压强的数值为 p_{to}。指定你在操作条件面板中设置的数为操作压强。如 7.12 节讨论的，fluent 中所有压强都是测量压强相对于操作压强。如果操作压强是 0，视为可压缩所流体计算情况，压强比的表达式简化为

$$\mathrm{PR} = \frac{p}{p_{\mathrm{to}}}$$

。要定义临界速度比 v/a_*，在涡轮机计算中有时会用到一个参数，用以下关联式

$$\frac{v}{a_*} = \left[\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)\left(1 - \mathrm{PR}^{(\gamma-1)/\gamma}\right)\right]^{1/2} \qquad (27.5.3)$$

在这个式中，a_*是临界速度（例如，如果 M=1 由于同样的临界点参数会出现的速度），r 是比热比，PR 是你在式 27.5-2 中自己定义函数压强比。对于 r，比热比，在性质范畴内选择比热比。要包括 PR,在流场函数第一个下拉列表中选择自定义流场函数，然后从第二个列表选择你赋予 PR 的函数名。

。假设在管内有回旋流，沿 z 轴排列，你想要计算通过一个横截面的角动量流速：

$$\int \rho r v_\theta \vec{v} \cdot d\bar{A} \qquad (27.5.4)$$

你可以为产物 rv_θ建立一个函数，r 是径向坐标，v_θ是切向速度。然后用面积分面板来计算流速的量。

28. 并行处理

Fluent 支持并行计算，且提供检查和修改并行配置工具。你可用一个专用并行机(如多处理器工作站)或通过工作平台的网络运行 Fluent。下面介绍 Fluent 并行计算的特点。

28.1 并行计算简介

Fluent 并行计算就是利用多个计算节点(处理器)同时进行计算。并行计算可将网格分割成多个子域，子域的数量是计算节点的整数倍(如 8 个子域可对应于 1、2、4、8 个计算节点)。每个子域(或子域的集合)就会“居住”在不同的计算节点上。它有可能是并行机的计算节点，或是运行在多个 CPU 工作平台上的程序，或是运行在用网络连接的不同工作平台(UNIX 平台或是 Windows 平台)上的程序。计算信息传输率的增加将导致并行计算效率的降低，因此在作并行计算时选择求解问题很重要。

推荐运行并行 Fluent 的操作步骤如下：

1. 开启平行求解器，选择计算节点数，详见 28.2 和 28.3 节。
2. 读入 case 文件，让 Fluent 自动将网格分割为几个子域。最好是在建立问题之后分割，因为这种分割和计算的模型有关(象非等形接触面、滑移网格、shell-conduction encapsulation 的自适应)。如果你的 case 文件中包含滑移网格，或是在计算过程中要对非等形接触面进行修改，那就得用串行求解器进行分割。

   还有其他的方法进行分割，如在串行或并行求解器上进行手工分割。
3. 仔细检查分割区域，如必要再重新分割，详见 28.4.5 节如何检查分割区域。
4. 进行计算，详见 28.5 节如何检查和提高并行计算。

28.2 开启并行求解器

开启 Fluent 并行求解器的方法依赖于操作平台是专用并行机还是工作站。

28.2.1 在 UNIX 系统下开启并行求解器

可以在装有 UNIX 系统的专用并行机或工作平台网络上运行 Fluent，如何运行如下：

在多处理器 UNIX 机上运行

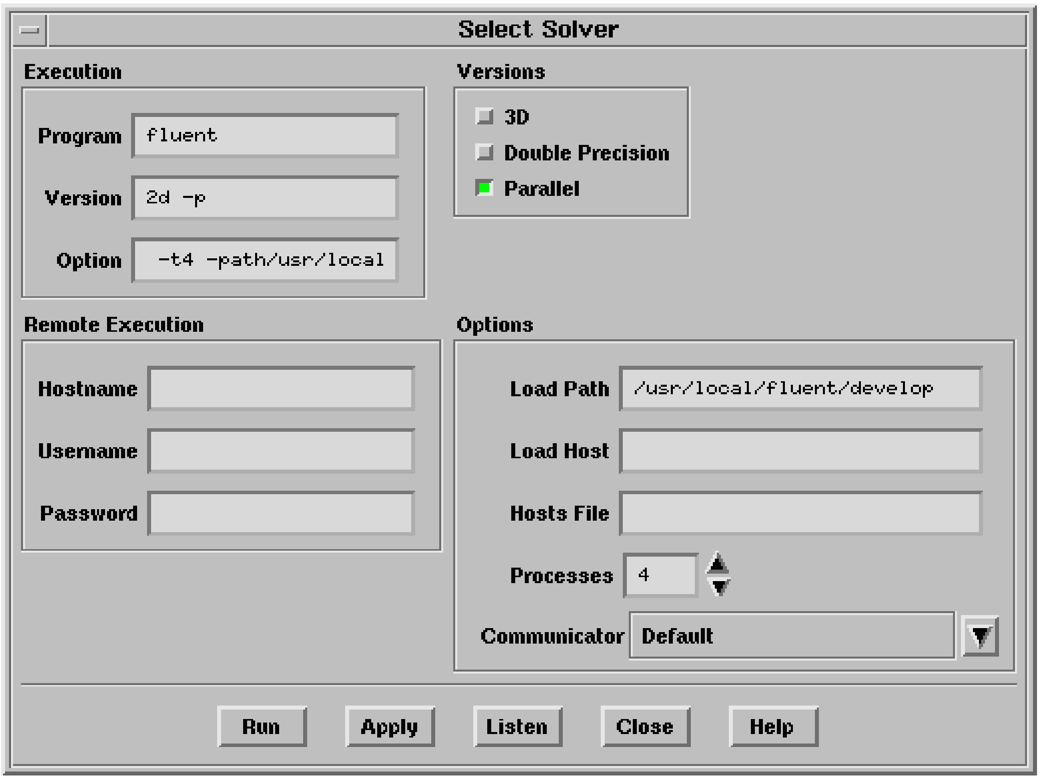


Figure 28.2.1: **Select Solver** 控制面板

在专用并行机(多处理器工作平台或大型并行机)运行 Fluent，键入运行命令，点击 Fluent 中 **File** →**Run. . .**，用 **Select Solver**(图 28.2.1)控制面板设定并行架构和求解器信息。

1. 在 **Version** 框里，点击 **3D** 和 **Double Precision** 来选择所求解问题是 3D 还是 2D 问题，所采用精度是单精度还是双精度，然后点击 **Parallel** 选项。
2. 在 **Options** 框里，在 **Communicator** 下拉菜单中选择所要用的信息传输库。推荐选用 **Default** 库，因为它可以为并行机提供最全面的并行操作。

   这里还包含 **Vendor MPI** 和 **Shared Memory MPI (MPICH)**。**Vendor MPI** 选用被机器硬件优化的信息传输库。如果机器上的硬件支持并行工具包，当选用 **Default** 时，Fluent 会自动检测它。**Shared Memory MPI (MPICH)** 选用 MPICH 信息传输库(MPI 公共域)。
3. 在 **Processes** 上选择并行计算的 CPU 数。
4. 点击 **Run** 按钮就可以进行并行计算了，一旦求解器开始运行，就不需要任何其他的设备了。

如果你想利用命令开始并行计算，可键入如下命令：

fluent *version* -t *n* [-p *comm*] [-load *host*] [-path *path*]

其中 *version* 可选择 2d、3d、2ddp 和 3ddp，*n* 指的是 CPU 数。其他的根据需要使用，使用时根据方括号提示的信息写(写时不包括方括号)。*comm* 指的是并行传输库的名称，*host* 指的是连接计算节点的主机(默认的是你使用的主机)名，*path* 指的是 Fluent.Inc 安装的路径。

!!一般，只有你想不用默认的传输库时才需要设置-p *comm*。

专用并行机上的传输装置和与它相关的传输库列表如下：

vmpi	vendor MPI
smpi	shared memory MPI (MPICH)
net	socket

在 UNIX 工作平台上运行

在 UNIX 工作平台网络上运行 Fluent，键入运行命令，点击 Fluent 中 **File** →**Run. . .**，用 **Select Solver**(图 28.2.1)控制面板设定并行架构和求解器信息。

1. 在 **Version** 框里，点击 **3D** 和 **Double Precision** 来选择所求解问题是 3D 还是 2D 问题，所采用精度是单精度还是双精度，然后点击 **Parallel** 选项。
2. 在 **Options** 框里，在 **Communicator** 下拉菜单中选择 **Socket** 信息传输库。

   !!当起用并行网络版是，必须选择 **Communicator** 下拉菜单的 **Socket**，除非 **Vendor MPI** 支持集成。如果选用 **Default** 时，就会起用一个 **MPI** 并行版本，那就不能生成附加计算节点。
3. 在 **Processes** 上设置初始并行计算节点数。可先从 1 或 0 个节点开始，后面再生成其他节点，详见 28.3.1 节。
4. (可选择)在 **Hosts File** 键入包含机器列表的文件的名字。如果 **Processes** 被设为 0，Fluent 会为文件中列出的每一台机器产生一个节点。
5. 点击 **Run** 按钮就可以进行并行计算了。

如果你想利用命令开始网络并行计算，可键入如下命令：

fluent *version* –t1 –pnet(用 socket 传输装置)

fluent *version* –t1 –pnmpi(用网络 MPI 传输装置)

这样就可以在工作平台上的某个计算节点上开启求解器了，然后用 **Network Configuration** 控制面板添加远程工作平台上的计算节点，详见 28.3.1 节。

如果键入如下命令：

fluent *version* –t0 –pnet [-cnf= *hostsfile*](用 socket 传输装置)

fluent *version* –t1 –pnmpi[-cnf= *hostsfile*] (用网络 MPI 传输装置)

这样就可以开启远程机器上的计算节点的控制程序。如果设置了-cnf= *hostsfile*，则在 *hostsfile* 文件中列出的每个机器都被设为一个计算节点，详见 28.3.1 节。

28.2.2 在 Windows 系统下开启并行求解器

可以在装有 Windows 系统的专用并行机或网络 Windows 平台上运行 Fluent。

在多处理器 Windows 机上运行

在 Windows 系统下，可通过 MS-DOS 窗口开启 Fluent 专用并行版本。如在 x 处理器上开启并行版本，可键入

fluent *version* –t *x*

在提示命令下，将 *version* 替换为求解器版本(2d、3d、2dpp、3ddp)，将 *x* 替换为处理器的数量(如 fluent 3d –t3 是在 3 台处理器上运行 3D 版本)。如果 Fluent 命令不被识别，1.5.3 节介绍了如何修改用户的环境变量。

在 Windows 工作平台上运行

有两种方法在 Windows 工作平台网络上运行 Fluent：一种是用 RSHD 传输装置软件，另外一种是采用硬件支持的信息传输接口(VMPI)。参考 Windows 并行安装说明书来安装。启动说明书是在假定机器已经装了必要的软件(遵照安装说明书安装)前提下的。

启动基于 RSHD 的 Fluent 并行版本

如果你的机器是采用 RSHD 软件进行网络传输的，在命令提示符中键入：

fluent *version* -pnet [-path *sharename*] [-cnf= *hostfile*] -t *nprocs*

- *version* 必须用你所运行的 Fluent 版本(2d、3d、2ddp、3ddp)代替。
- -path *sharename* 是用通用命名标准设定 Fluent.Inc 路径的网络共享名。只有你不是在安装 Fluent 的那台机器上计算才进行这项操作，如果是在同一台机器上进行计算就不必键入这项信息。例如，Fluent 是安装在 computer1 上，就将 *sharename* 用共享路径\\computer1\Fluent.Inc 代替。
- -cnf= *hostfile* 指定所有你要运行并行工作的计算机列表的文件。如果这个文件不在系统默认的路径下，就要给出它的全路径。用 Notepad 类文本编辑器生成 hostfile，仅有的要求就是文件名中不能含有空格，如 hosts.txt 是对的，而 my hosts.txt 不行。这个 hostfile 要包含如下内容：

  computer1
  computer2

  !!列表中的第一个计算机必须是你所使用的计算机。

  如果网络上的计算机是多处理器，可将它在列表中多写几次。例如，computer1 有两个 CPU，在 hosts.txt 中就要将 computer1 列两次，如下：

  computer1
  computer1
  computer2

  如果你没有用-cnf 选项，Fluent 会在命令栏里进行 *nprocs* 操作。然后就可以用 Fluent 里 **Network Configuration** 控制面板在工作站上引入交互式计算节点。
- -t *nprocs* 设置所用节点数。如果-cnf 被选用，*hostfile* 就会自行选择那几台计算机用于并行工作。例如，*hostfile* 里列有 10 台计算机，而你只想用其中的 5 个节点进行计算，就可以将 *nprocs* 设为 5(即-t5)，Fluent 就会用 *hostfile* 中列出的前 5 台计算机工作。可用 **Network Configuration** 控制面板杀掉进程或是引入其他节点，详见 28.3 节。

例子：对一个基于 RSHD 的 3D 问题，启用名字为 hosts.txt 的 hostfile 中前 3 台计算机进行并行计算的完整命令是：

fluent 3d -pnet -cnf=hosts.txt -path\\computer1\fluent.inc -t3

启动基于 **Vendor-MPI** 的 Fluent 并行版本

如果你的机器是采用硬件支持的 MPI 软件进行网络传输的，在命令提示符中键入：

fluent *version* –pvmpi [-path *sharename*] [-cnf= *hostfile*] -t *nprocs*

各选项的含义与上节中相同，但要注意以下两点：

- hostfile 是必须的。当使用 MPI 软件时不能用 **Network Configuration** 控制面板为工作站引入计算节点(注意：列表中的第一个计算机必须是你所使用的计算机)。
- 当使用 MPI 软件时不能用 **Network Configuration** 控制面板杀掉进程或是引入新的计算节点。

例子：对一个基于 Vendor-MPI 的 3D 问题，启用名字为 hosts.txt 的 hostfile 中前 3 台计算机进行并行计算的完整命令是：

fluent 3d –pvmpi -cnf=hosts.txt -path\\computer1\fluent.inc -t3

28.3 使用并行网络工作平台

可利用在网络上连接的工作平台引入(杀掉)计算节点来形成一个虚拟并行机。即使一个工作平台仅有一个 CPU，也允许有多个计算节点共同存在。

28.3.1 配置网络

若想将计算节点引入到几台机器上，或是对当前网络配置进行一些修改(如当启动求解器时发现主机上引入了太多的计算节点)，可通过点击 **Parallel →Network →Configure...** 打开 **Network Configuration** 控制面板(见图 28.3.1)来设置。

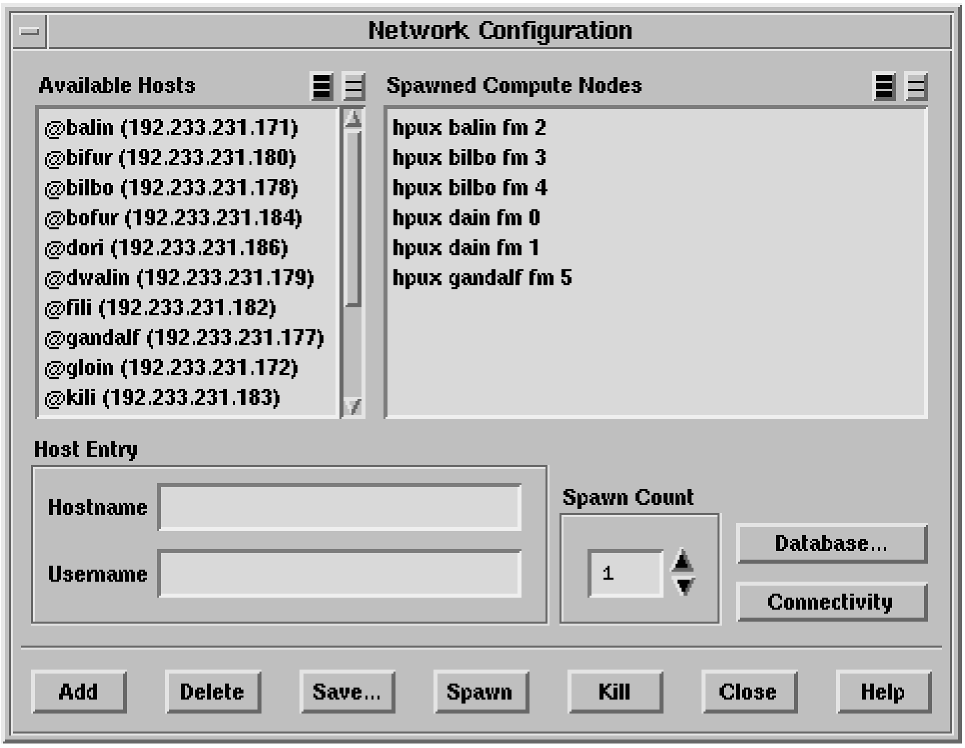


Figure 28.3.1: Network Configuration 控制面板

网络结构

计算节点的标签从 0 开始顺序增加。除计算节点外，还有一个主机节点。Fluent 启动时主机节点也自动启动，而退出 Fluent 时它也随之被关闭，在 Fluent 运行时它不能被关掉。

而计算节点随时都可以关闭，节点 0 除外，因为它是最后一个计算节点，主机总是引入节点 0，而节点 0 引入所有其他节点。

引入计算节点的步骤

引入计算节点的基本步骤如下：

1. 在 **Available Hosts** 列表中选取要引入节点的主机。如果所需要的机器未被列出，可在 **Host Entry** 里手工增加一个主机，或是从 host database 中复制所需要的主机(见 28.3.2 节)。
2. 在 **Spawn Count** 里为每个被选主机设置计算节点数。
3. 点击 **Spawn** 按钮，新的节点就会被引入，并被添加到 **Spawned Compute Nodes** 列表中。

其他的和网络配置有关的用途在下面介绍：

手动增加主机

在 **Network Configuration** 控制面板上的 **Available Hosts** 列表里手动增加一个主机，可在 **Host Entry** 下的 **Hostname** 里键入远端机器的网络名，在 **username** 里键入机器的注册名(除非所有的帐户都是相同的注册名，这种情况不需要指定 *username*)，然后点击 **Add** 按钮，这个被指定的主机就被加到了 **Available Hosts** 列表里。

删除主机

在 **Network Configuration** 控制面板上的 **Available Hosts** 列表里删除一个主机，选择这个主机，点击 **Delete** 按钮，这个主机名就被从 **Available Hosts** 列表里删除了(但主机数据库不受影响，见 28.3.2 节)。

杀掉计算节点

如果引入了一个不需要的计算节点，要杀掉它，可在 **Spawned Compute Nodes** 列表中选中它，然后点击 **Kill** 按钮即可。

!!注意：计算节点 0 只有当它是最后一个计算节点时才能被杀掉。

保存 Hosts 文件

如果已经编辑了一组 **Available Hosts** 列表，还想在另一个进程中使用它，可将此组列表中所有信息存为一个 hosts 文件。点击 **Save...**按钮，会弹出 **Select File** 对话框，键入文件名，执行保存。当你想用时，可将此文件载入主机数据库(见 28.3.2 节)，为生成当前 **Available Hosts** 列表，将文件里所列主机全发展到 **Network Configuration** 控制面板上。

节点引入时通常出现的问题

引入进程时系统会尝试和新节点建立连接，但 50 秒后系统未从新节点获取回应，它就会认为这次引入是不成功的。如果远程计算机不能找到可识别的 Fluent，就会出现这种情况。若想测试在引入新机器时是否生成新节点，可在所引入机器上的 DOS 窗口运行如下命令

rsh [-l *username*] *hostname* fluent -t0 -v

hostnam 是想引入新节点的机器的网络名，*username* 是被 *hostnam* 指定的远程机器的注册名。

!!如果所有帐户都是相同的注册名，这种情况不需指定 *username*(方括号内的-l *username* 不总需要被设置，而键入注册名时不含有方括号)。另外注意，在某些系统下，DOS 命令 rsh 要用 remsh 代替。

引入节点失败的几点原因：

注册不正确。机器引入新节点必须能 rsh 到新进程执行的机器上，不然引入就失败。要成功 rsh 有好几种方法，可求助于系统管理员。

Fluent 不被识别。成功 rsh 到远程机器，但在远程机器上却无法找到 Fluent 的路径，这时可用 csh 命令，将 Fluent 的路径加到.cshrc 文件的路径变量里。如果这样还是失败，那就在引入新节点之前用 parallel/network/path 命令直接设置 Fluent.Inc 安装的路径。

28.3.2 主机数据库

建立工作平台的并行网络时，很容易生成局域网机器列表(“hosts file”)，将包含这些机器名的文件加载到主机数据库，然后点击 **Parallel →Network →Database...**(或点击 **Network Configuration** 控制面板上的 **Database...**按钮)，利用 28.3.2 图示的 **Hosts Database** 控制面板，在工作平台上选择那些组成并行配置(或网络)的主机。



Figure 28.3.2: Hosts Database 控制面板

如果主机文件 fluent.hosts 或.fluent.hosts 在根目录里，它里面的内容将在程序启动时自动加载到主机数据库里，否则主机数据库为空，直到读入一个主机文件。

读主机文件

如已有包含局域网内机器列表的主机文件，可点击 **Load...**按钮，在弹出 **Select File** 对话框里选中此文件，将其加载到 **Hosts Database** 控制面板里。当文件被读入之后，主机名字就会被显式在 **Hosts** 列表中(Fluent 自动添加每台可识别机器的 IP 地址，如果某台机器不在当前局域网内，它将被标以 **unknown**)。

将主机复制到 Network Configuration 控制面板

若想将 **Hosts Database** 控制面板内的 **Hosts** 复制到 **Network Configuration** 控制面板中 **Available Hosts** 列表里，选择列表中所需复制的名字，点击按钮，被选中的主机就会被添加到你想引入节点机器的 **Available Hosts** 列表中。

28.3.3 检测网络连通性

对任何计算节点，都可以查看如下网络连通性信息：主机名、体系结构、操作 ID、被选节点 ID 以及所有被连接的计算机。被选节点的 ID 用星号标识。

Fluent 主进程的 ID 总是主机，计算节点则从 node-0 开始按顺序排列，所有计算节点都被连接在一起，计算节点 0 被连接到主进程。

为了获得某计算节点的连通性信息，可点击 **Parallel →Show Connectivity...**，打开 **Parallel Connectivity** 控制面板(图 28.3.3)

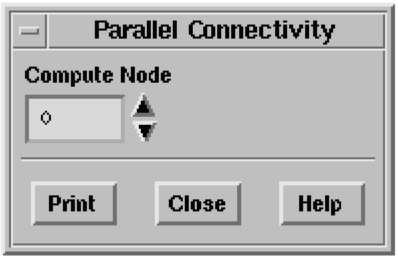


Figure 28.3.3: Parallel Connectivity 控制面板

在 **Compute Node** 区域选择想要了解连通性信息的计算节点数，然后点 **Print** 按钮，例如，节点 0 的输出信息如下所示：

ID	Hostname	O.S.	PID	Mach ID	HW ID	Name
node-2	fili	irix	16729	2	11	Fluent Node
node-1	bofur	irix	16182	1	10	Fluent Node
host	balin	sunos	5845	0	7	Fluent Host
node-0*	balin	sunos	5864	0	-1	Fluent Node

O.S.指体系结构，PID 是进程 ID 数，Mach ID 是计算节点 ID，HW ID 是交换机的标识符。

也可以在 **Network Configuration** 控制面板里查看某个计算节点的连通性，方法是在 **Spawned Compute Nodes** 列表中选择此节点，然后点 **Connectivity** 按钮。如果没有选中 **Spawned Compute Nodes** 里的任何节点而点了 **Connectivity** 按钮，**Network Configuration** 控制面板将重新被打开，再按照上述方法作就行了。如果选中 **Spawned Compute Nodes** 里的两个以上节点，点 **Connectivity** 按钮，可显式每个节点的连通性信息。

28.4 分割网格

28.4.1 网格分割的一般方法

在用 Fluent 的并行求解器时，需要将网格细分割为几组单元，以便在分离处理器上求解(见图 28.4.1)。将未分割的网格读入并行求解器里，可用系统默认的分割原则(推荐使用，详见 28.4.2 节)，还可以在连续求解器里或将 mesh 文件读入并行求解器后自己分割(详见 28.4.3 节)。上述任一情况可用的分割方法在 28.4.4 节介绍。在建立问题(定义模型、边界条件等)之前或之后分割网格都可以，不过，由于某些模型的特点(象非等形接触面、滑移网格、shell-conduction encapsulation 的自适应)，最好是在建立问题后。

!!如果 case 文件含有滑移网格或非等形接触面，要在计算过程中进行自适应，因此要用连续求解器分割，详见 28.4.2 和 28.4.3 节。

值得注意的是计算节点间的相关单元的分布在网格自适应时要保持不变，除非是非等形接触面，这样在自适应后就不必重新分割了，详见 28.4.6 节。

若在网格分割前用连续求解器建立问题，用于此项工作的计算机必须有足够大的内存来读入网格。如果网格太大，不能读进连续求解器，可将未分割的网格直接读入并行求解器里(使用所有被定义主机的内存)，然后让并行机自动分割。在这种情况下，你将在做一个初步网格分割后建立问题。如果必要可以手工再重新分割一次。在 28.4.2 节和 28.4.3 节介绍了详细情况和限制条件，28.4.5 节将介绍如何检测网格分割。

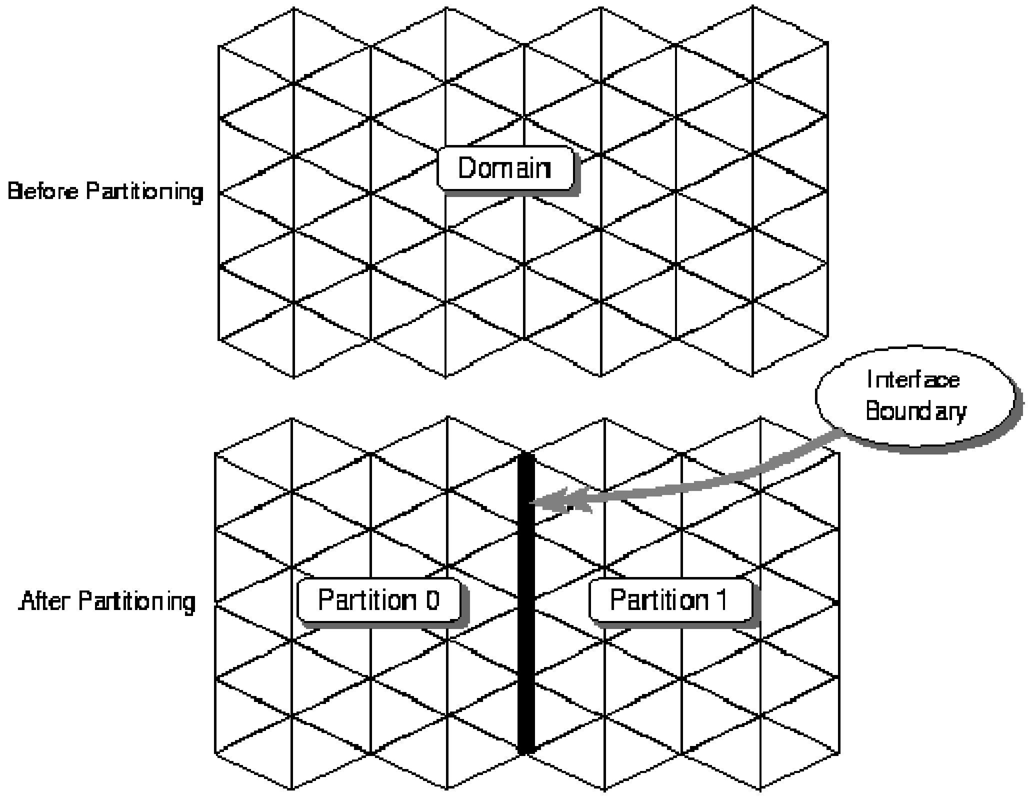


Figure 28.4.1: 网格分割

28.4.2 自动分割网格

在将 case 文件读入并行求解器之前选用两分法或是其他网格分割方法来自动分割网格。对一些方法，可预览来确定是否为最佳的网格分割，28.4.4 节介绍 Fluent 里可用的网格分割方法。

注意 case 文件中含有滑移网格或非等形接触面，在计算过程中要自适应，则需要在连续求解器中分割此文件，然后再把它读入并行求解器，在 **Auto Partition Grid** 控制面板上选择 **Case File** 选项。

并行求解器上自动网格分割的步骤如下：

1. (任选)在菜单栏上点 **Parallel** →**Auto Partition...**，弹出 **Auto Partition Grid** 控制面板(图 28.4.2)，设置分割参数。

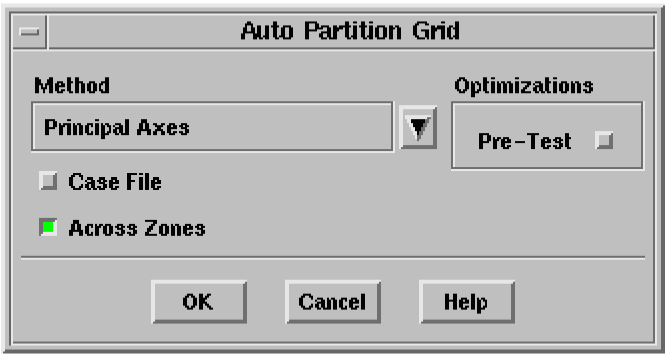


Figure 28.4.2: Auto Partition Grid 控制面板

读入 mesh 文件或 case 文件时如果没有获取分割信息，那就保持 **Case File** 选项开启，Fluent 会用 **Method** 下拉菜单里的方法分割网格。

设置分割方法和相关选项的步骤如下：

a) 关闭 **Case File** 选项，就可选择控制面板上的其他选项。

b) 在 **Method** 下拉菜单里选取两分方法，此方法在 28.4.4 节详细介绍。

c) 可为每个单元分别选取不同的网格分割方法，也可以利用 **Across Zones** 让网格分割穿过区域边界。推荐不采用对单元进行单独分割(关闭 **Across Zones** 按钮)，除非是溶解过程需要不同区域上的单元输出不同的计算信息(主区域包括固体和流体区域)。

d) 若选取 **Principal Axes** 或 **Cartesian Axes** 方法，可在实际分割之前对不同两分方向进行预测试以提高分割性能。用预检则开启 **Pre-Test** 选项，见 28.4.4 节。

e) 点击 **OK**。

如果 case 文件已经网格分割，且网格分割的数量和计算节点数一样，那就可以在 **Auto Partition Grid** 控制面板上默认选择 **Case File** 选项，这会让 Fluent 在 case 文件中应用分割。

2. 读入 case 文件，方法是在菜单栏上选 **File** → **Read** → **Case...**。

自动分割过程的报告

当网格自动分割时，有关分割进程的信息就会被显示在控制窗口上。如果想需要额外信息，可在分割完成后，选 **Parallel** → **Partition...**，弹出 **Partition Grid** 控制面板，打印报告。

在 **Partition Grid** 控制面板上点击 **Print Active Partitions** 或 **Print Stored Partitions** 时，Fluent 会在控制窗口里显示分割 ID、单元数、面数、接触面数和每个活动或已储存分割的接触面曲率，还可以显示最小和最大的单元、面、接触面和面曲率变量，详见 28.4.5 节。安装 28.4.5 节介绍的方法利用图形查看分割状况。

28.4.3 手动分割网格

在网格分割时推荐使用并行求解器上的自动分割，也可在连续求解器或并行求解器上手动分割。在自动或手动分割后，可以检查生成的分割(见 28.4.5 节)，如果必要可重新分割。在连续或并行求解器里，利用 **Partition Grid** 也可同样作。已分割的网格也可毫无损失的在连续求解器里使用。

分割网格的指导方针

手动分割网格时推荐采用如下步骤：

1. 用默认的两分方法(**Principal Axes**)和优化方法(**Smooth**)分割网格。
2. 检查分割统计表(见 28.4.5 节)。在开启负载平衡(单元变化)时，主要是使球形接触面曲率和接触面曲率变量最小。如果统计表不能使用，可尝试其他的两分方法。
3. 一旦确定问题所采用的最佳两分方法，如需要就可以开启 **Pre-Test** 提高分割质量。
4. 如需要可用 **Merge** 优化提高分割质量

下面是手动分割的说明。

用 Partition Grid 控制面板

分割网格，需要选择生成网格分割的两分方法、设置分割数、选择区域和记录、以及所使用的优化方法等。对某些方法可采用预测试的方法以选择最好的两分方法。一旦在 **Partition Grid** 控制面板上设置了所有你都满意的参数，点 **Partition** 按钮，将网格用所选的两分方法和优化方法分割成所需要的数量。

在菜单栏上选 **Parallel** → **Partition...**，弹出 **Partition Grid** 控制面板(并行求解器见图 28.4.3，连续求解器见图 28.4.4)，可在上面设置所有相关的输入参数。

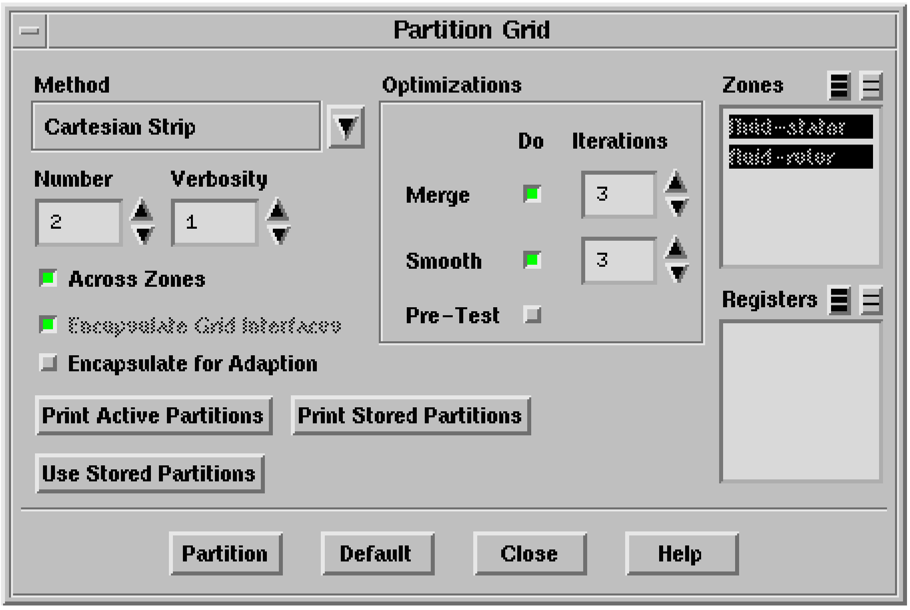


Figure 28.4.3: 并行求解器上的 **Partition Grid** 控制面板

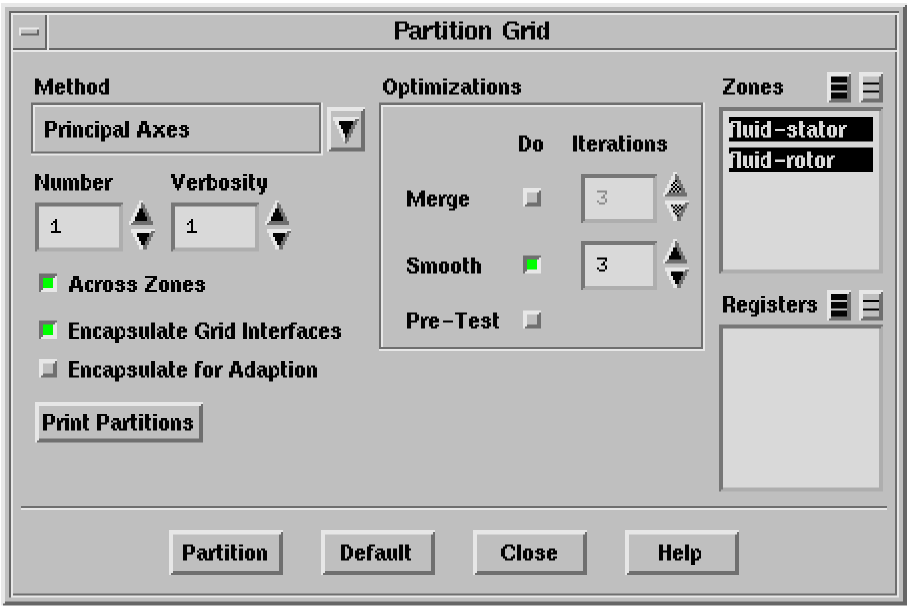


Figure 28.4.4: 连续求解器上的 **Partition Grid** 控制面板

1. 在 **Method** 下拉菜单里选取两分方法，此方法在 28.4.4 节详细介绍。
2. 在 Number 里设置你想要分割的整数值。可以用计数箭头来增加或减小这个值，也可直接键入某整数值。此数值必须是整数，且是并行计算处理器数的倍数。
3. 可为每个单元分别选取不同的网格分割方法，也可以利用 **Across Zones** 让网格分割穿过区域边界。推荐不采用对单元进行单独分割(关闭 **Across Zones** 按钮)，除非是溶解过程需要不同区域上的单元输出不同的计算信息(主区域包括固体和流体区域)。
4. 如果你想单元将 mesh 里所有的非等形网格接触面都围绕起来，并且在计算的过程中始终在同一个分割里，可选择 **Encapsulate Grid Interfaces**。当有滑移或网格被调整时，网格接触面必须被压缩，则当前网格为滑移网格时，**Encapsulate Grid Interfaces** 选项总是被选中的。如果 case 文件中含有在计算过程中自适应的非等形

接触面，就不得不在连续求解器中选择 **Encapsulate Grid Interfaces** 和 **Encapsulate for Adaption** 选项来分割它。

5. 如果在连续求解器中选择 **Encapsulate Grid Interfaces** 选项，**Encapsulate for Adaption** 选项也被选中了。当选中此选项时，单元附加层将被压缩，因此并行时就不必进行单元传递了。
6. 可用 **Optimizations** 下的选项来激活和控制想采用的优化方法。通过选中 **Do** 按钮来激活 **Merge** 和 **Smooth** 格式。可为每个格式选择 **Iterations** 数。当遇到合适的标准或迭代最大数已被执行完时就会应用每一个优化格式。若 **Iterations** 数为 0，则一完成就会应用优化格式，而没有迭代最大数的限制。
7. 若选取 **Principal Axes** 或 **Cartesian Axes** 方法，可在实际分割之前对不同两分方向进行预测试以提高分割性能。用预检则开启 **Pre-Test** 选项，见 28.4.4 节。
8. 在 **Zones** 和 **Registers** 列表里，选择所想分割的分区和记录表。大多数情况下，选择所有的 **Zones** (默认)分割整个区域，详细说明在下面介绍。
9. 点击 **Partition** 按钮分割网格。
10. 若感觉新的分割比先前的(网格已被分割)更好，可点击 **Use Stored Partitions** 按钮激活上次存储的单元分割(保存一个 case 文件就会存储最后一次进行的单元分割)，用于当前的计算中。

用区域或记录表分割

对单元分区和记录表的分割约束性可使你对一个域的子域采用不同的分割方法。例如，你的几何形状包含一个连接到矩形管道的圆柱实体，则可以用 **Cylindrical Axes** 方法分割圆柱体，用 **Cartesian Axes** 方法分割矩形管道。

如果圆柱体和矩形管道位于不同的单元区域，可一次选一个作所需的分割。如果它们不是在两个不同的单元区域，就可以用函数为每个区域标记调整后的单元，生成一个单元记录表(基本上是一个单元列表)。这些函数根据物理位置、单元体积、某变量的梯度和等值、及其他参数标记单元。第 23 章介绍了如何进行标记，23.9 节提供用不同的记录表生成新的记录表的方法，一旦生成就可用上述方法进行分割了。

!!使用 Fluent 的并行版本或分割方法选用 **Metis** 时不能使用分区和记录表分割网格。

分割报告

若网格已被分割，和分割程序有关的信息就会显示在控制窗口里。默认情况下，求解器打印产生的分割数，单元、面、接触面和面曲率变量的最小值和最大值。如果将 **Verbosity** 从默认的 1 增加到 2，所用分割方法，分割 ID，单元、面和接触面的数量，以及每个分割上的接触面的曲率也会显示在控制窗口上。如果将 **Verbosity** 减小到 0，仅有产生的分割数和分割所需时间被显示。

若分割完成后也可以将一部分信息显示出来。在并行求解器上点 **Print Active Partitions** 或 **Print Stored Partitions**，Fluent 就会在控制窗口上显示分割 ID，单元、面和接触面的数量，以及每个活动或存储的分割上的接触面的曲率。在连续求解器上点 **Print Partitions**，也可获取相同的信息。

!!再次提醒：若感觉新的分割比先前的(网格已被分割)更好，可点击 **Use Stored Partitions** 按钮激活上次存储的单元分割(保存一个 case 文件就会存储最后一次进行的单元分割)，用于当前的计算中。

重新设置分割参数

如果想修改所设置的分割参数，通过点 **Default** 按钮就会返回到 Fluent 默认的设置，**Default** 按钮被点后就会变为 **Reset** 按钮。**Reset** 可使你返回到最近保存的设置(象点 **Default** 按钮前设置的数值)，被点后就会变为 **Default** 按钮

28.4.4 网格分割方法

并行程序的网格分割有三个主要目标：

- 生成等数量单元的网格分割。
- 使分割的接触面数最小——减小分割边界面积。
- 使分割的邻域数最小。

平衡分割(平衡单元数)可确保每个处理器有相同的负载，分割被同时传输。既然分割间的传输是强烈依赖于时间的，那使分割的接触面数最小就可以减少数据交换的时间。使分割的邻域数最小，可减少网络繁忙的机会，而且在那些初始信息传输比较长信息传输更耗时间的机器来说尤为重要，特别是对依靠网络连接的工作站来说非常重要。

Fluent 里的分割格式是采用两分的原则来进行的，但不象其他格式那样需要分割数，它对分割数没有限制，对每个处理器都可以产生相同分割数(也就是分割总数是处理器数量的倍数)。

两分法

网格采用两分法则进行分割。被选用的法则被用于父域，然后利用递归应用于子域。例如，将网格分割成四部分，求解器将整个区域(父域)对分为两个子域，然后对每个子域进行相同的分割，总共分割为四部分。若将网格分割成三部分，求解器先将父域分成两部分——一个大概是另一个的两倍大——然后再将较大子域两分，这样总共就分为三部分。

网格可用下列的任一方法进行分割。最有效的方法是和求解问题有关的，所以可试用不同的方法，直至某一个适合所求解问题，28.4.3 节介绍了分割策略。

Cartesian Axes：两分基于笛卡儿坐标系的单元区域(见图 28.4.5)。它两分父域，所有子域都垂直于活动区域最长轴方向。因此也被称为坐标两分。

Cartesian Strip：采用坐标两分，但严格垂直于父域最长轴方向(见图 28.4.6)。可用这种方法使分割邻域数最小。

Cartesian X-, Y-, Z- Coordinate：两分基于所选笛卡儿坐标系的区域。它两分父域，所有子域都垂直于指定方向(见图 28.4.6)。

Cartesian R Axes：两分区域，使得从单元中心到笛卡儿轴(x，y 或 z)的径向距离最短，这样开始接触面积最小。此种方法限用于 3D 情况。

Cartesian RX-, RY-, RZ-Coordinate：两分区域，使得从单元中心到所选笛卡儿轴(x，y 或 z)的径向距离最短。此种方法限用于 3D 情况。

Cylindrical Axes：两分基于单元柱坐标系的区域，此方法限用于 3D 情况。

Cylindrical R-, Theta-, Z-Coordinate：两分基于所选柱坐标系的区域，此方法限用 3D 情况。

Metis：用 METIS 软件包分割不规则图形，这是由 Army HPC 研究中心和 Minnesota 大学的 Karypis 和 Kumar 提出的。它采用多级近似将精细图形上的点和边结合形成一副粗糙的图形，这副粗糙图被分割，再回复到原始图形。在使变粗糙和恢复的过程中，此方法被用于高质量分割。

!!值得注意的是用 socket 版本(-pnet)时，不能用 METIS 进行分割。在这种情况下，可用下面的分割滤波器进行 METIS 分割

Polar Axes：两分基于单元极坐标系的区域(见图 28.4.9)，此方法限用于 2D 情况。

Polar R-Coordinate, Polar Theta-Coordinate：两分基于所选极坐标系的区域(见图 28.4.9)，此方法限用于 2D 情况。

Principal Axes：两分基于主轴坐标系的区域(见图 28.4.7)。若主轴是笛卡儿轴时，即是 Cartesian bisection。此原则也要考虑力矩、惯性矩或惯性力矩。它是 Fluent 里默认的两分方法。

Principal Strip：采用力矩两分，但严格垂直于父域最长主轴方向(见图 28.4.6)。可用这种方法使分割邻域数最小。

Principal X-, Y-, Z-Coordinate：两分基于所选主坐标系的区域(见图 28.4.8)。

Spherical Axes：两分基于单元球坐标系的区域，此方法限用于 3D 情况。

Spherical Rho-, Theta-, Phi-Coordinate：两分基于球坐标系的区域，此方法限用于 3D 情况。

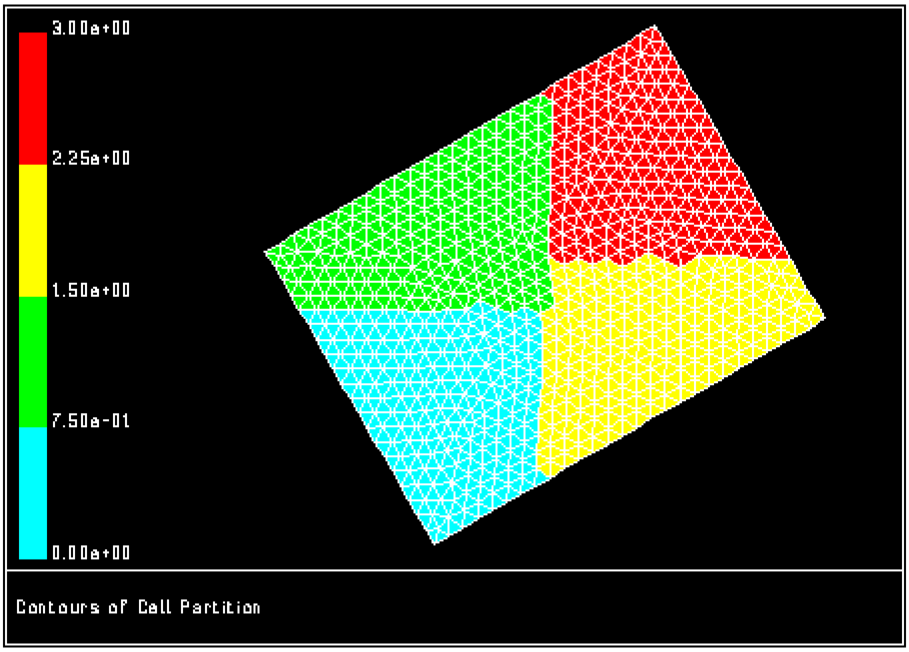


Figure 28.4.5: 用 **Cartesian Axes** 方法产生的分割

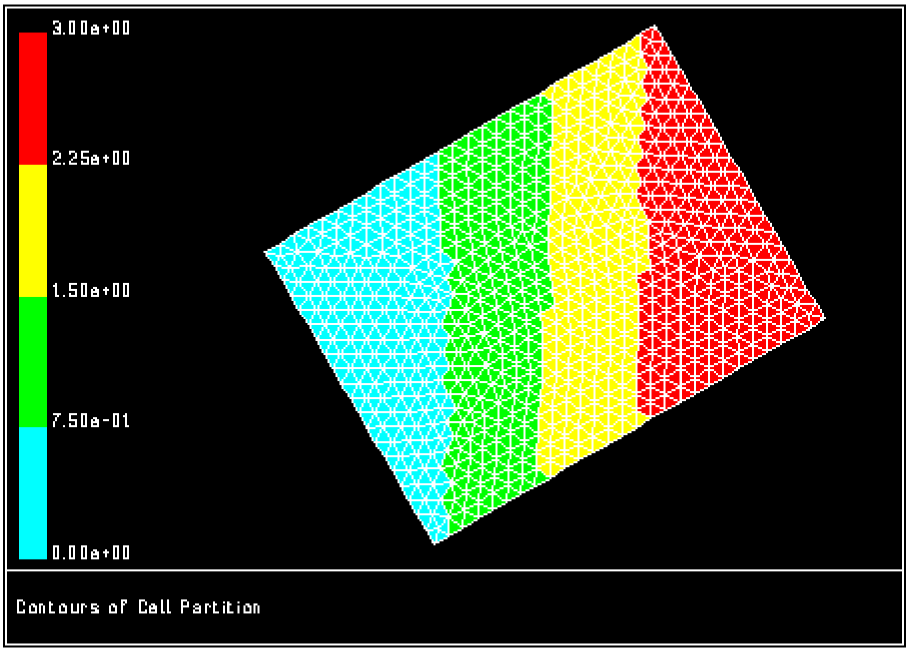


Figure 28.4.6: 用 **Cartesian Strip** 或 **Cartesian X-Coordinate** 方法产生的分割

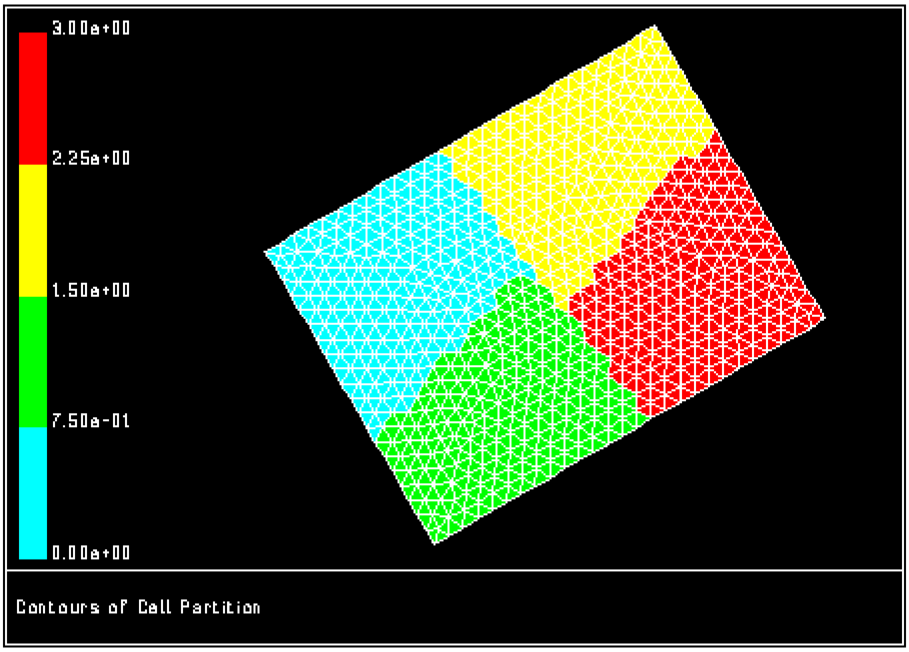


Figure 28.4.7: 用 **Principal Axes** 方法产生的分割

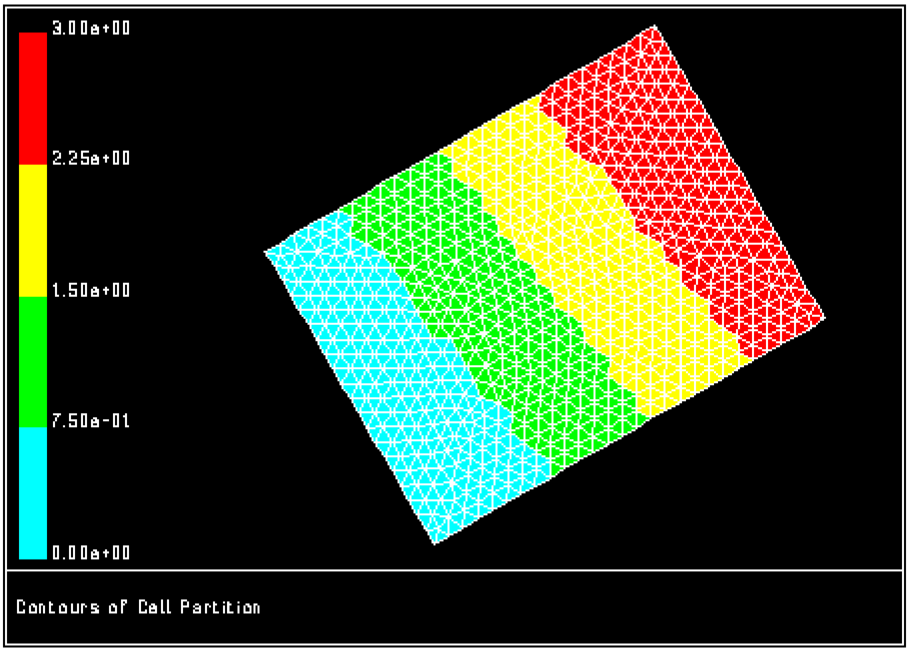


Figure 28.4.8: 用 **Principal Strip** 或 **Principal X-Coordinate** 方法产生的分割

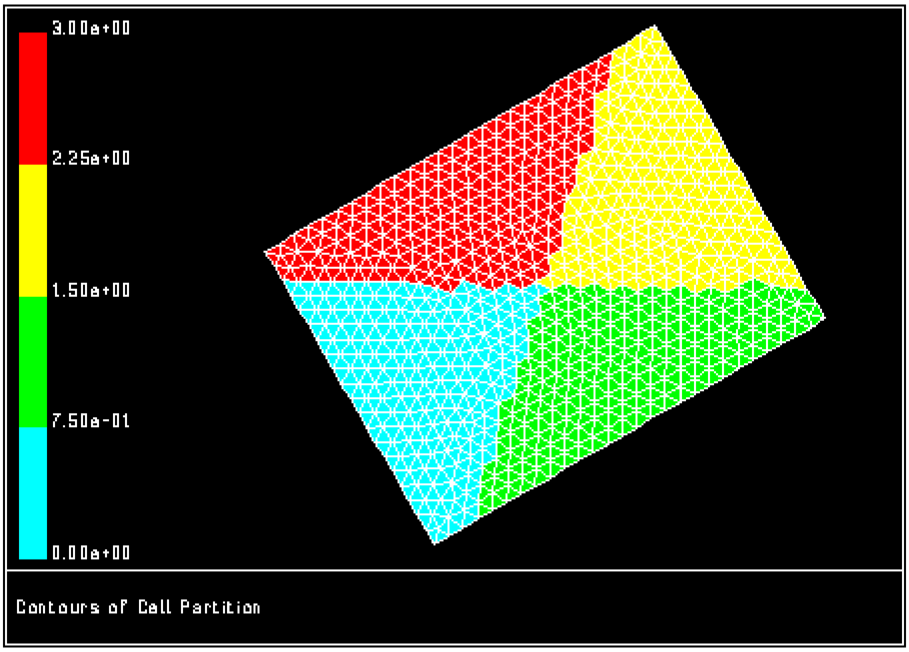


Figure 28.4.9: 用 **Polar Axes** 或 **Polar Theta-Coordinate** 方法产生的分割

优化

优化可以提高网格分割的质量。垂直于最长主轴方向的两分方法并不是生成最小接触边界的最好方法，“pre-testing”操作可用于在分割之前自动选择最好的方向。

迭代的优化格式主要有：

光滑

通过分割间交换单元的方式使分割接触面数最小。此格式贯穿分割边界，如果接触边界面消失就传到相邻分割。

合并

从每个分割中消除孤串。一个孤串就是一组单元，组里的每个单元至少都有一个面是接触边界。孤串会降低网格质量，导致大量传输损失。

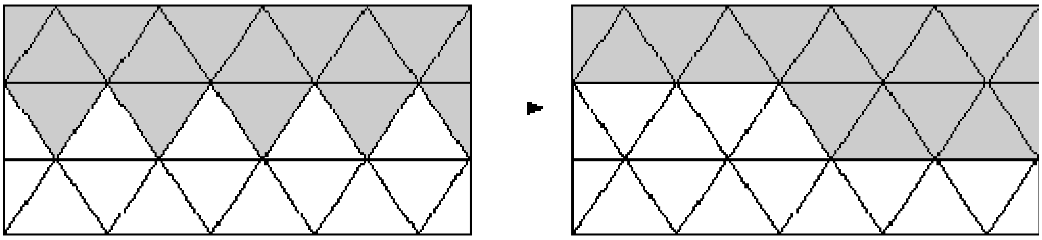


Figure 28.4.10:光滑优化

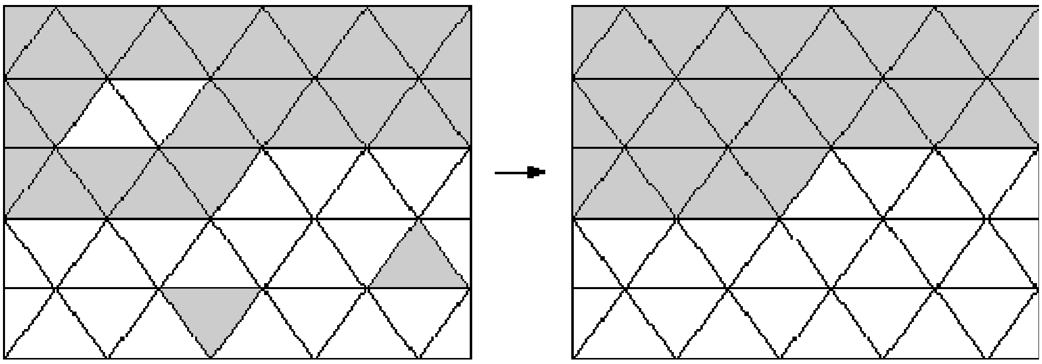


Figure 28.4.11:合并优化

一般，Smooth 和 Merge 是相对比较节省资源的优化方法。

预测试

如果选 **Principal Axes** 或 **Cartesian Axes** 方法，可在实际分割之前对不同两分方向进行预测试以提高分割性能。如果不用预测试(默认)，Fluent 会采用垂直于长主轴方向的两分法。

如果选用预测试，在 **Partition Grid** 控制面板上点 **Partition** 按钮或用自动分割读入网格时都会自动运行预测试。它将测试所有的坐标方向，最后选择使分割接触面最少的两分法。

使用预测试将增加分割所需的时间。相比不进行预测试，对 2D 问题将增加 3 倍时间，对 3D 问题将增加 4 倍时间。

使用分割过滤器

象上面提到的，在 **Auto Partition Grid** 和 **Partition Grid** 控制面板里可使用通过过滤器的 METIS 分割方法。对未分割的网格使用 METIS 分割方法，在菜单栏选 **File →Import → Partition →Metis...**，Fluent 就会用 METIS 分割网格，然后将分割读入求解器。分割数要和处理器数相等，然后再进行模型定义和求解。

!!直接通过分割过滤器引入到并行求解器里需要主机有足够的内存运行。否则在单机上运行就需要单机有足够的内存。可以在有足够内存的机器上启动并行求解器，重复上面的步骤，也可以在新机器上手动运行过滤器，然后再将分割的网格读入主机上的并行求解器。

用分割过滤器手动分割网格，使用如下命令：

utility partition *input-filename partition-count output-filename*

其中 *input-filename* 是要被分割网格的文件名，*partition-count* 是需要分割的数量，*output-filename* 是被分割网格的文件名。然后就可以将分割的网格读入求解器(使用标准的 **File/Read/Case...**菜单方式)，再进行模型定义和求解。

用 **File/Import/Partition/Metis...**将一个未分割的网格引入并行求解器里，METIS 分割整个网格。也可用 **File/Import/Partition/Metis Zone...**单独分割每个单元分区。

这种方法可用于平衡工作负载。例如，如果一个 case 有一个流体分区和一个固体分区，则单独分割每个分区会使工作负载更平衡。

28.4.5 检查分割

分割网格后，要查看分割信息，并从图形上检查分割。

解释分割统计表

自动或手动分割完成后需要显示报告。在并行求解器里，在 **Partition Grid** 控制面板里点 **Print Active Partitions** 或 **Print Stored Partitions** 按钮，在连续求解器里点 **Print Partitions** 按钮。

Fluent 在并行时是区分活动单元分割和存储单元分割这两种单元分割格式的。初始两者都被设为读入 case 文件建立的单元分割。如果用 **Partition Grid** 重新分割网格，新的分割就是指存储单元分割。要是其成为活动分割，在 **Partition Grid** 控制面板上选 **Use Stored Partitions** 按钮。活动单元分割被用于当前计算中，而存储单元分割用于保存一个 case 文件情况。这种区别可让我们在某一台机器或网络上分割一个 case，而在另一台机器上求解它。基于这两种格式的区别，在不同的并行机上，可以用一定数量的计算节点将网格划分为任意不同个数的分割，保存 case 文件，再将它加载到指定机器上。

在连续求解器里选 **Print Partitions**，就可获得存储分割的信息。

由分割程序产生的输出包括递归的划分和迭代优化程序的信息。它是最后分割网格的信息，包括分割 ID，单元数、面数、接触面数、每个分割上接触面的曲率、相邻分割数，以及单元、面、接触面、邻域、平均单元、面曲率和球面曲率变量。球面曲率变量指的是当前分割的各个量的最小值和最大值。例如，在下面例子中，分割 0 和 3 有最小的接触面数(10)，分割 1 和 2 有最大的接触面数(19)，因此这个变量是 10-19。

开启负载平衡时，就是要使接触面曲率变量和球接触面曲率的值较小。

>> Partitions:

P	Cells	I-Cells	Cell Ratio	Faces	I-Faces	Face Ratio	Neighbors
0	134	10	0.075	217	10	0.046	1
1	137	19	0.139	222	19	0.086	2
2	134	19	0.142	218	19	0.087	2
3	137	10	0.073	223	10	0.045	1

Partition count = 4
Cell variation = (134 - 137)
Mean cell variation = (-1.1% - 1.1%)
Intercell variation = (10 - 19)
Intercell ratio variation = (7.3% - 14.2%)
Global intercell ratio = 10.7%
Face variation = (217 - 223)
Interface variation = (10 - 19)
Interface ratio variation = (4.5% - 8.7%)
Global interface ratio = 3.4%
Neighbor variation = (1 - 2)

Computing connected regions; type ^C to interrupt.

Connected region count = 4

将一个 case 文件读入并行求解器里，分割 ID 要和计算节点 ID 相对应。当一个 case 文件里的分割数要比计算节点数大时，假如 M 是分割数和计算节点数的比例，则计算节点 0 上的分割 ID 为 0－(M-1)，计算节点 1 上的分割 ID 为 M－(2M-1)，依此类推。

在图形上检查分割

要进一步获得分割信息，选择 **Display** → **Contours...**，可以绘出网格分割的等值图，如图 28.4.5－28.4.9 所示。

要显示活动单元分割或存储单元分割，选择 **Contours Of** 下拉列表里的 **Cell Info...**，然后选 **Active Cell Partition** 或 **Stored Cell Partition**，并关闭 **Node Values** 的显示(25.1.2 节介绍了关于显示等值线的有关信息)

!!如果还没有建立问题，为了应用 **Contours** 就需要进行求解初始化。

28.4.6 负载分布

如果用于并行计算的处理器的速度明显不同，可在菜单栏上打开 parallel →partition → set →load-distribution，为分割设置一个负载分布。

例如，在三个节点上计算，其中一个比另外两个速度要快两倍，那就可以为速度快的机器分配两倍于另外两台机器的单元数(负载矢量为(2 1 1))，则在网格分割时，分割 0 将会分割的单元数是分割 1 和 2 的两倍。

对上例，因为分割 0 要分割的单元数是其他的两倍，所以速度快的机器将被映射为节点 0。否则，也可以使用负载平衡，让 Fluent 自动消除计算节点间的负载差异。

!!如果一个网格含有非等形接触面，要重新平衡计算节点间的负载，就要在修改后保存 case 和 data 文件，然后将 case 和 data 文件读入连续求解器，在 **Partition Grid** 控制面板上选用 **Encapsulate Grid Interfaces** 和 **Encapsulate for Adaption** 重新分割，再次保存 case 和 data 文件。如何手动将 case 和 data 文件读入并行求解器，从上次停止的地方继续计算。

28.5 检测并提高并行性能

想了解并行计算的性能到底怎样，可通过执行观测窗口来观测计算时间、信息传输时间和并行效率。为了优化并行机，可利用 Fluent 自带的负载平衡来控制计算节点间的信息量。

28.5.1 检测并行性能

执行观测窗口可报告所剩计算时间，以及信息传输的统计表。执行观测窗口总是被激活的，也可在计算完成后通过打印来获取统计表。要观看当前的统计表，在菜单栏上选菜单 **Parallel/Timer/Usage**。

执行统计表也可用文本处理器打开。

在菜单栏上选菜单 **Parallel/Timer/Reset**，清除执行表可以在将来的报告中删除过去的统计信息。

28.5.2 优化并行求解器

增加报告间隔

在 Fluent 里，通过增加残差 printing/plotting 或其他求解追踪报告的间隔减少信息传输，提高并行性能。点 **Solve →Iterate...**，在弹出的 **Iterate** 控制面板里修改 **Reporting Interval** 的值即可。

!!注意要等到每个报告间隔结束才能中断迭代。

负载平衡

Fluent 里有动态负载平衡的功能。用并行程序的主要原因是减小模拟的变化时间，理想情况它是和计算源的总速度成比例的。例如，如果你用 4 台 CPU 求解你的问题，并且假定 CPU 之间需要很少的的数据传输，所有 CPU 的速度都是一样的，都用于计算这个问题，一般希望变化时间减少到四分之一，这当然是理想情况，实际上是不可能的。例如，CPU 的速度根据工作平台的机器类型不同而变化，其他的任务用一个或几个 CPU 即将完成，在并行求解器之间的或外源引起的网络堵塞都会延迟一些 CPU 之间必要的信息传输。

如果激活 Fluent 里的动态负载平衡，计算源和网络源的负载会被周期性的监控。如果负载平衡器确定可通过再分配计算节点间的单元来提高性能，它就会自动将其提高。负载平衡本身有时间延迟，所以默认它是关闭的。如果你用一个专用同类源，或采用不同类源但在网格分割过程中通过设置负载分布已考虑 CPU 速度之间的差异，那就不需要用负载平衡了。

!!如果此时的接触面是非等形的，或采用壳传导模型，是不能开启负载平衡的。

点击 **Parallel →Load Balance...**，打开 **Load Balance** 控制面板(图 28.5.1)，用以激活和控制 Fluent 的自动负载平衡。负载平衡会自动检测和分析并行性能，然后通过将已存在计算节点间单元的再分配来优化并行性能。

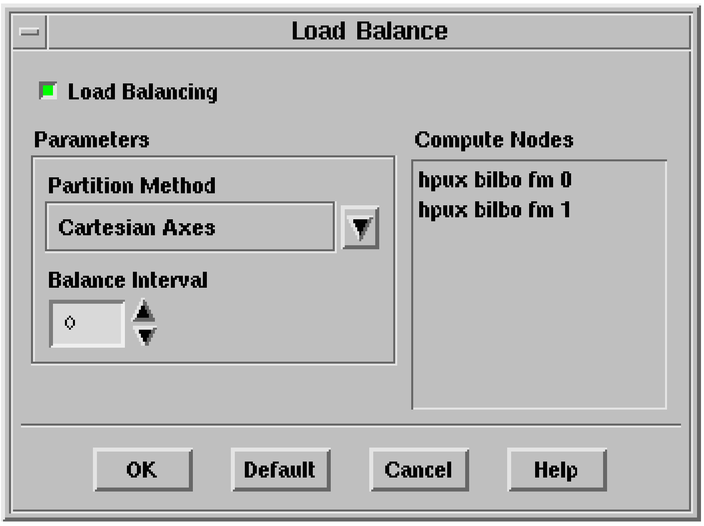


Figure 28.5.1: Load Balance 控制面板

使用负载平衡的操作步骤如下：

1. 开启 **Load Balancing** 选项。
2. 在 **Partition Method** 下拉菜单里选择对分(bisection)方法(见 28.4.4 节)产生新的网格分割。作为自动负载平衡程序的一部分，可用特定的方法将网格重新细分。这样的分割被分配在计算节点之间以获得平衡的负载。
3. 设置所需的 **Balance Interval**。如果其值为 0，Fluent 会自己为其去一个最佳值，初始是用 25 次迭代的间隔。取一个非零值就可以限制其行为。然后 Fluent 会在每 N 步之后进行一次负载平衡，N 就是设置的 **Balance Interval**。要选择一个足够大的间隔以平衡由于进行负载平衡所付出的。

你可以在任何时候中断计算，关掉(或开启)负载平衡，然后继续计算。